

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра мікроелектроніки
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 20__ р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності _____
(код і назва)

на тему: Поглиняльні покриття НВЧ діапазону на основі композитних матеріалів

Виконав: студент 6 курсу, групи ДП – 71 мп
(шифр групи)

Коломієць Віталій Олегович
(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник доц., к.т.н., доц. Татарчук Д.Д.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., доц., к.т.н. Орлов А.Т.

Консультант з інформаційних питань ст. викл., к.т.н. Діденко Ю.В.

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

РЕФЕРАТ

Актуальність теми.

Серед нових матеріалів особливе місце займають композитні матеріали, що володіють цілим комплексом різних властивостей, раціональне поєднання яких дозволяє отримувати оптимальні конструкції. Тому технічний прогрес породжує необхідність розробки нових композитних матеріалів. За останні роки було створено нові матеріали із заданими властивостями, розроблено технологію їх виробництва і методи розрахунку.

Одним із різновидів композиційного матеріалу є поглинальні покриття. Для зниження рівня випромінювань, можна використовувати композитні та електропровідні полімерні матеріали низької добротності, тобто матеріали поглинального типу. Це матеріали з керованим поглинанням і відбиттям електромагнітної хвилі, який останнім часом привертає велику увагу, так знаходять широке застосування у вимірювальній та контрольній техніці, техніці зв'язку та радіолокації, медицині. Одним з переваг таких матеріалів є можливість простого керування їхніми параметрами шляхом зміни концентрації впроваджуваного компонента в композит.

В роботі запропонована методика проектування багат шарових радіопоглинаючих матеріалів, яка дозволяє виконати розрахунок оптимальних широкосмугових поглиначів з урахуванням частотної дисперсії діелектричної та магнітної проникності шарів матеріалів.

При створенні подібних радіопоглинаючих матеріалів враховуються дві основні умови: узгодження із зовнішнім простором, тобто мале відбиття від зовнішньої поверхні і повне поглинання енергії хвилі, що пройшла всередину покриття. Найбільші широкосмуговими є поглиначі з комбінованим принципом дії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота пов'язана з науковими програмами, планами та темами що розроблюються на кафедрі.

Мета і задачі дослідження.

Метою даної роботи є дослідження властивостей метало-діелектричних композитів у НВЧ діапазоні. Для досягнення мети, необхідно виконати наступні задачі:

1. Моделювання діелектричних властивостей метало-діелектричних композиційних матеріалів у НВЧ діапазоні частот.
2. Експериментальна перевірка отриманої моделі.
3. Запропонувати варіанти практичного застосування композиційних матеріалів діелектрик-метал.

Об'єктом дослідження є метало-діелектричні композити.

Предмет дослідження є електродинамічні властивості поглинального покриття НВЧ діапазона.

Методика наукового дослідження включає: обчислювання методом енергетичних коефіцієнтів.

Практичне значення одержаних результатів.

Метало-діелектричних композиційних матеріалів у НВЧ діапазоні частот

Особистий внесок здобувача:

- Дослідження діелектричних властивостей метало-діелектричних композиційних матеріалів у НВЧ діапазоні частот для різних зразків матеріалів.
- Виготовлення моделі поглинального покриття НВЧ діапазона.

Структура і об'єм роботи.

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 117 сторінок. Робота включає 32 рисунка, 29 таблиць, список використаних джерел з 49 найменувань.

Апробація результатів дисертації проходила у онлайн-конференції та публікації наукової статті. Перелік представлено нижче.

Коломієць В.О., Поглинальні покриття НВЧ діапазона на основі композитних матеріалів / Коломієць В.О., Путяк Д.О., Черченко М.О. // Міжнародна наукова інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (випуск 32), Тернопіль, ст. 130-136

Ключові слова: композиційний матеріал, поглинальні покриття, електродинамічні властивості, коефіцієнти відбиття та проходження.

ABSTRACT

Actuality of theme.

Among the new materials, a special place is occupied by composite materials possessing a whole complex of different properties, the combination of which allows to receive optimal designs. Therefore, technical progress generates the need for the development of new composite materials. During recent years, new materials with specified properties have been created, their production technology and calculation methods have been developed.

One of the varieties of composite material is pink coatings. To reduce the level of radiation, it is possible to use low-quality composite and electrically conductive polymeric materials, that is, materials of an absorbent type. These materials with controlled absorption and reflection of the electromagnetic waves, recently attracted much attention, and are widely used in measuring and control techniques, communication techniques and radar, and medicine. One of the advantages of such materials is the possibility of controlling their parameters by changing the concentration of the introduced component into the composite.

In this work the method of designing multilayer radio-absorbing materials is proposed, which allows to calculate optimal broadband absorbers taking into account the frequency dispersion of dielectric and magnetic permeability of material layers.

When creating such a radio-absorbing material, two basic conditions are taken into account: harmonization with the outer space, that is, the small reflection from the outer surface and the complete absorption of the energy of the wave that has passed inside the coating. The largest bandwidths are sinks with a combined principle of action.

Relationship of work with scientific programs, plans, themes.

The work is connected with the scientific programs, plans and themes that are being developed at the department.

The purpose and tasks of the study.

The purpose of this work is to study the properties of metal-dielectric composites in the microwave range. To achieve the goal, one need to accomplish the following tasks:

1. Modeling dielectric mantles of metal-dielectric composite materials in microwave frequency bands.
2. Experimental verification of the obtained model.
3. To offer variants of practical application of composite materials dielectric-metal.

The object of research is metal-dielectric composites.

The subject of research is the electrodynamic properties of the perineal coating of the microwave range.

The methodology of scientific research includes: calculation of the energy coefficient method.

The practical value of the results.

Metal-dielectric composite materials in microwave frequency bands

The applicant's personal contribution:

- Dilution of dielectric mantles of metal-dielectric composite materials in microwave frequency bands for different material samples.
- Manufacturing of the absorption coating model of the microwave oven.

Structure and volume of work.

The work consists of an introduction, four chapters, conclusions and a list of sources used. The total volume of the dissertation is 117 pages. The work includes 32 drawings, 29 tables, list of used sources of 49 titles.

Approbation of the results of the dissertation was carried out in an online conference and publication of a scientific article. The list is shown below.

Kolomiets VO, Absorption coatings of microwave ovens based on composite materials / Kolomiets VO, Putiak D.O., Cherchenko M.O. // International Scientific Internet Conference "Information Society: Technological, Economic and Technical Aspects of Formation" (issue 32), Ternopil, Art. 130-136

Key words: composite material, bending coatings, electrodynamic properties, coefficients of reflection and passing.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	10
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1: КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ	13
1.1. Класифікація композиційних матеріалів	13
1.2. Методи виготовлення волокон і композиційних матеріалів	41
1.3. Застосування композиційних матеріалів	55
Висновки до розділу	60
РОЗДІЛ 2: МОДЕЛЮВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	61
2.1. Методи розрахунку	61
2.2. Модель поглинальних покриттів на основі композитних матеріалів.....	68
Висновки до розділу	78
РОЗДІЛ 3: ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТАЛО- ДІЕЛЕКТРИЧНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ	80
3.1. Методика виготовлення зразків композиційних матеріалів різного складу та структури	80
3.2. Методика експериментальних досліджень	82
3.3. Результати експериментальних досліджень залежностей енергетичних коефіцієнтів відбиття та проходження від об'ємної частки металевого наповнювача	89
3.4. Результати експериментальних досліджень залежностей діелектричної проникності зразків від об'ємної частки металевого наповнювача	93
Висновки до розділу	97
РОЗДІЛ 4: РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	98
4.1. Опис ідеї проекту	98
4.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	100
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	100
4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту	107

4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	109
Висновки до розділу	112
ВИСНОВКИ	113
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	114

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

КМ – композиційний матеріал
МКМ – металевий композиційний матеріал
ПКМ – полімерний композиційний матеріал
ККМ – керамічний композиційний матеріал
ФФБ – фенол формальдегідні смоли
ЕС – епоксидні смоли
ПЕ – поліетилен
ПЕН – поліетилен низького тиску
ПЕВТ – поліетилен високого тиску
ПП – поліпропілен
ПС – полістирол
ПА – поліаміди
ПІ – поліаміди
ДШП – дерево-шаруваті пластики
НВЧ – надвисокочастотне випромінювання
ВВ – вуглецеві волокна
ЕМХ – електромагнітна хвиля
МГО – метод геометричної оптики
РПМ – радіо поглинальний матеріал
НПМ – низько добротний полімерний матеріал
НДМ – низько добротний матеріал
АО – антенний обтічник
КСХ – коефіцієнт стоячої хвилі
РЕС – радіоелектронні системи
ДР – діелектричний резонатор
СВ – спрямований відгалужувач
ЕРС – електрорушійна сила

ВСТУП

Серед нових матеріалів особливе місце займають композитні матеріали, що володіють цілим комплексом різних властивостей, раціональне поєднання яких дозволяє отримувати оптимальні конструкції. Тому технічний прогрес породжує необхідність розробки нових композитних матеріалів. За останні роки було створено нові матеріали із заданими властивостями, розроблено технологію їх виробництва і методи розрахунку.

Одним із різновидів композиційного матеріалу є поглинальні покриття. Для зниження рівня випромінювання, можна використовувати композитні та електропровідні полімерні матеріали низької добротності, тобто матеріали поглинального типу. Це матеріали з керованим поглинанням і відбиттям електромагнітної хвилі, який останнім часом привертає велику увагу, так знаходять широке застосування у вимірювальній та контрольній техніці, техніці зв'язку та радіолокації, медицині. Одним з переваг таких матеріалів є можливість простого керування їхніми параметрами шляхом зміни концентрації впроваджуваного компонента в композит.

В роботі запропонована методика проектування багат шарових радіопоглинаючих матеріалів, яка дозволяє виконати розрахунок оптимальних ширококутових поглиначів з урахуванням частотної дисперсії діелектричної та магнітної проникності шарів матеріалів.

При створенні подібних радіопоглинаючих матеріалів враховуються дві основні умови: узгодження із зовнішнім простором, тобто мале відбиття від зовнішньої поверхні і повне поглинання енергії хвилі, що пройшла всередину покриття. Найбільші ширококутовими є поглиначі з комбінованим принципом дії.

Саме тому метою даної роботи є дослідження властивостей металодіелектричних композитів у НВЧ діапазоні. Для досягнення мети, необхідно виконати наступні задачі:

1. Моделювання діелектричних властивостей метало-діелектричних композиційних матеріалів у НВЧ діапазоні частот.
2. Експериментальна перевірка отриманої моделі.
3. Запропонувати варіанти практичного застосування композиційних матеріалів діелектрик-метал.

Об'єктом дослідження є метало-діелектричні композити.

Предмет дослідження є електродинамічні властивості поглинального покриття НВЧ діапазона.

РОЗДІЛ 1: КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

1.1. Класифікація композиційних матеріалів

Композитний матеріалом називають штучно створений неоднорідний суцільний матеріал, що складається з двох і більше компонентів, окремих волокон або інших складових та матриці, що їх сполучає, з чіткою межею розділу між ними. Властивості композиту за визначенням мають відрізнятися від властивостей його складових. Компоненти композитів не повинні розчинятися або поглинати один одного. Вони повинні бути добре сумісні.

Для того щоб систематизувати КМ за різними ознаками, грамотно реалізувати процедуру вибору КМ для виготовлення різних деталей, впорядкувати термінологію в галузі матеріалознавства композитів, необхідна обґрунтована класифікація цих матеріалів. Єдиної загальноприйнятої класифікації композиційних матеріалів немає. Це пояснюється тим, що КМ представляють найширший клас матеріалів, що поєднує метали, полімери та кераміку. Найбільш часто використовується класифікація композиційних матеріалів, в основу якої покладено їх поділ за матеріалом.

Класифікація КМ за матеріалом матриці. Найбільш важливими ознаками класифікації КМ є матеріал матриці. КМ з металевою матрицею називають металевими композиційними матеріалами МКМ, з полімерною матрицею - полімерними композиційними матеріалами ПКМ, з керамічною - керамічними композиційними матеріалами ККП. КМ, що містять два і більше різних за складом матричних матеріалів, називають поліматричного [1].

Назва ПКМ зазвичай складається з двох частин. У першій частині називається матеріал наповнювача, в другій наводиться слово «пластик», або «волокна». Наприклад, полімерні композити, армовані скловолокном, називаються склопластиками; металевими волокнами - металопластик,

органічними волокнами - органопластика, борними волокнами - боропластиками, вуглецевими волокнами - вуглепластик.

Для характеристики МКМ частіше використовують подвійне позначення: спочатку пишуть матеріал матриці, потім - матеріал волокна. Наприклад, позначення мідь - вольфрам ($Cu - W$) відповідає композиційному матеріалу, в якому матрицею є мідь, а волокнами - вольфрам. Для ККМ характерно таке ж позначення, як і для МКМ. Наприклад, позначення окис алюмінію-молібдену ($Al_2O_3 - Mo$) відповідає композиційному матеріалу з матрицею з окису алюмінію і молібденовими волокнами. У деяких випадках для позначення КМ використовується одне складне слово, наприклад бороалюміній або вуглеалюміній. У цьому випадку перша частина слова відповідає матеріалу волокна, а друга - матеріалу матриці.

Класифікація КМ по геометрії армуючих елементів. Класифікація відповідно до геометрії армуючих елементів (порошки або гранули, волокна, пластини) приведена в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Класифікація композиційних матеріалів до геометрії армуючих елементів

Армуючий елемент	Композиційні матеріали
Порошки	Порошкові - дисперсно-зміцнені КМ
Волокна	Волокнисті - КМ, армовані безперервними і дискретними волокнами
Пластини	Пластичні - шаруваті КМ, що складаються з безперервних і дискретних пластин які чергуються

Класифікація КМ за структурою і розташуванням компонентів. Відповідно до цієї класифікації КМ діляться на групи з матричною, шаруватою, каркасною і комбінованою структурою. Матричну структуру мають дисперсно-зміцнені і армовані КМ. До матеріалів з шаруватою структурою відносяться

композиції, отримані з набору шарів, що чергуються, фольги або листів матеріалів різної природи і складу. До композиційних матеріалів із каркасною структурою відносяться матеріали, отримані методом просочування. Комбіновану структуру мають матеріали, що містять комбінації перших трьох груп.

Класифікація матричних КМ по схемі армування, конструкційний принцип. За орієнтацію і тип арматури всі КМ можна розділити на дві групи - ізотропні і анізотропні. Ізотропним називають матеріали, які мають однакові властивості в усіх напрямках. Властивості анізотропних матеріалів залежать від напрямку в досліджуваному об'єкті.

КМ з матричної структурою діляться на хаотично-армовані і впорядковано-армовані (рис. 1.1). Хаотично-армовані КМ містять армуючі елементи у вигляді дисперсних включень, дискретних або безперервних волокон. Ці матеріали є ізотропним або квазіізотропними. Термін квазіізотропний означає, що КМ є анізотропним в мікрообсязі, але ізотропним в обсязі всього виробу [2].

Класифікація КМ по методам отримання (технологічний принцип). Відповідно до цієї класифікації КМ діляться на матеріали, отримані рідкофазним і твердофазними методами, а також методами осадження - напилення, комбінованими методами.

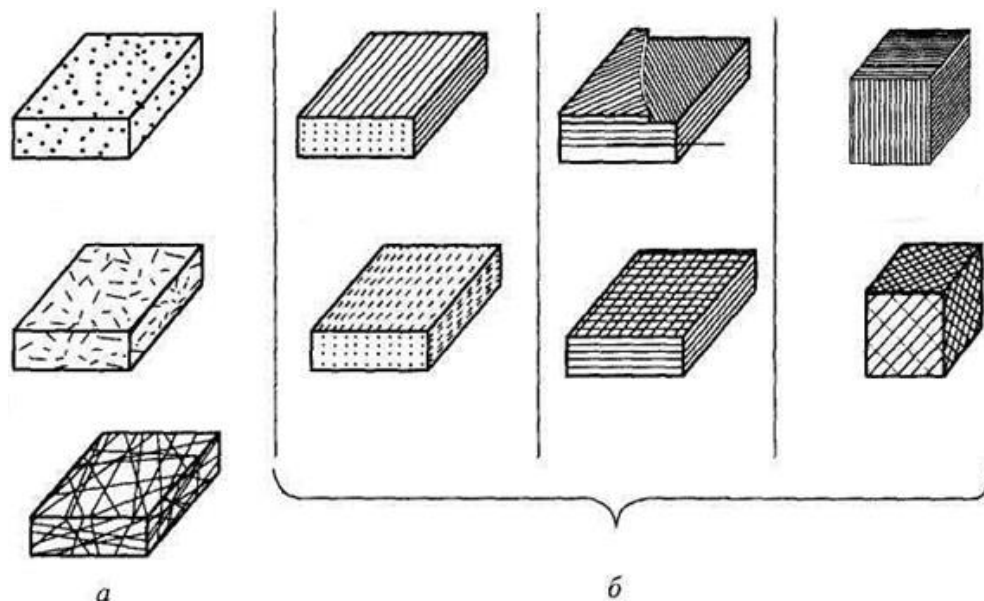


Рисунок. 1.1. – Класифікація композиційних матеріалів за конструктивною ознакою: хаотичні (а), одномірні і просторово армовані (б) [3]

До рідкофазний методів належать просочення (просочення арматури полімерами або розплавленими металами) і спрямована кристалізація сплавів. До твердофазних методам отримання КМ відносяться прокатка, екструзія, кування, штампування, ущільнення вибухом, дифузійна зварювання, волочіння. Композиційні матеріали, одержувані твердофазними методами, використовуються у вигляді порошку або тонких листів. При отриманні КМ методами осадження - напilenня матриці наноситься на волокна з розчинів солей або інших сполук, з парогазової фази, з плазми. Комбіновані методи полягають в послідовному або паралельному застосуванні декількох методів.

Класифікація КМ за призначенням. Класифікація КМ за призначенням досить умовна, оскільки часто композити є багатофункціональними матеріалами. Проте, серед безлічі КМ виділяють матеріали загального конструкційного призначення (несучі конструкції суден, літаків, автомобілів), жароміцні матеріали (лопатки турбін літаків, камери згорання), термостійкі матеріали (вироби, що працюють в умовах частих тепловмінів), фрикційні матеріали (гальмівні колодки), антифрикційні матеріали (підшипники ковзання), міцні матеріали (броня літаків, танків), теплозахисні матеріали, матеріали зі спеціальними властивостями (магнітними, електричними).

Поняття матриця характеризує безперервну просторову фазу, відповідальну за збереження конфігурації виробу, передачу експлуатаційних навантажень на арматуру, опір дії інших зовнішніх факторів.

Розробка полімерних матриць для ПКМ - серйозна і важлива проблема, оскільки багато властивостей композиту визначаються структурою матриці.

Вимоги до матриць можна розділити на 3 групи:

- до першої групи можна віднести міцність, жорсткість, теплостійкість полімерної матриці,
- до другої - пластичність, тріщиностійкість, ударну в'язкість;
- до третьої - засвоюваність, технологічність сполучного.

Завдання дослідника, який конструє композиційний матеріал, знайти компроміс, оптимізувати, враховуючи ще екологічні, економічні, кон'юктурні.

Можна виділити наступні типи матриць: металеві (алюміній і сплави, магнієві сплави, титан і його сплави, мідь, сплави нікелю і кобальту); полімерні (термопласти: поліетилен, полістирол, політетрафторетилен, полівінілхлорид, поліфеніленоксид, поліфеніленсульфід, поліетилентерефталат, полікарбонат, поліаміди; реактопласти: фенолоальдегідні смоли, аміносмоли (карбамідоформальдегідні смоли, меламіноформальдегідні, аніліноформальдегідні смоли), ненасичені полієфірні смоли, епоксидні, поліуретанові смоли; еластомери: ізопренові каучуки, керамічні (звичайна кераміка: силікати; технічна кераміка: оксиди Al_2O_3 , карбіди SiC , нітриди Si_3N_4 , борида TiB_2 , сульфід BeS ; кермети: сполуки, що містять керамічну (Al_2O_3) і металеву складову (Cr, Ni, Co, Fe)).

Металеві матриці. Алюміній і ливарні сплави на їх основі найбільш часто застосовуються при виготовленні композитів. Алюміній використовується при отриманні композитів як рідкофазними так і твердофазними методами. При виготовленні композиційних матеріалів твердофазними методами широко застосовують алюмінієві сплави. Переваги алюмінієвих сплавів: мала щільність, високий рівень механічних властивостей, висока технологічна пластичність. Для отримання композитів рідкофазними методами (литтям, просоченням) застосовують ливарні алюмінієві сплави. Ці сплави містять крім алюмінію в Mg, Si, Mn, Cu в незначних кількостях і відрізняються підвищеною вологотекучістю, малою лінійною усадкою, зниженою схильністю до утворення тріщин при підвищених температурах. Композиційні матеріали на основі алюмінію також можуть бути отримані методами порошкової металургії і газотермічного напилення.

Високою питомою міцністю, малою щільністю володіють магнієві сплави. Магній практично не реагує з багатьма матеріалами, використовуваними для отримання зміцнюючих волокон. Висока питома міцність титану і його сплавів дозволяє широко використовувати їх в літакобудуванні та космічній техніці. Армуючи титан і його сплави високомодульними волокнами, можна забезпечити високу жорсткість композиційних матеріалів. Низький рівень міцності

властивостей при підвищених температурах обмежує застосування міді. При виробництві композиційних матеріалів можливе усунення цього недоліку за рахунок армування міді волокнами вольфраму, заліза, графіту.

Недоліком композиційних матеріалів на основі технічно чистого нікелю є їх низька жаростійкість. Для усунення цього недоліку застосовують жароміцні і ливарні сплави $Ni - Cr$. Високий рівень тривалої міцності, опору повзучості сплавів, що деформуються досягається введенням титану і алюмінію, що утворюють дисперсні частинки інтерметалідів типу Ni_3Ti і Ni_3Al , а також легуванням тугоплавкими елементами W , Mo , Nb . Композиційні матеріали на основі нікелевих сплавів отримують за допомогою рідкофазними і твердофазними методами, а також методами порошкової металургії.

Кобальт і його сплави застосовують у вигляді порошків, розплаву або частинок, що наносяться газофазними методами. Від нікелевих сплавів кобальтові сплави відрізняє менша міцність при підвищених температурах, що пояснюється відсутністю інтерметаллідним зміцненням. Рідкофазні методи отримання композиційних матеріалів придатні як для ливарних, так і для сплавів, що деформуються.

Полімерні матриці. Полімерну матрицю для композиційних матеріалів вибирають, враховуючи умови експлуатації виробів. Від матеріалу матриці значно залежать властивості композиту: міцність, тепло- і вологостійкість, стійкість до дії агресивних середовищ, метод отримання виробу.

Полімери в якості матриці використовують або в чистому вигляді (порошки, гранули, плівки), або у вигляді сполучних. Сполучна представляє собою дво- або багатокомпонентну систему з синтетичного полімеру і затвердувачів, ініціаторів або каталізаторів, прискорювачів затвердіння. В сполучних з метою надання необхідних технологічних і експлуатаційних властивостей можуть бути додані розчинники, барвники, пластифікатори, стабілізатори та інші компоненти.

При виробництві армованих пластиків найбільш часто застосовують термореактивні сполучні, при нагріванні яких відбуваються незворотні структурні і хімічні перетворення, безперервно розширюється використання термопластичних полімерів і еластомерів. Нижче подано коротку характеристику основних типів полімерів, що знайшли застосування при виготовленні ПКМ.

Термореактивні полімери під дією тепла і хімічно активних добавок можуть набувати просторової структуру, що супроводжується втратою плинності. Термореактивні полімери порівняно рідко застосовуються в чистому вигляді, коли вони містять тільки структуровані добавки. Зазвичай в них вводять сумісні і несумісні добавки, такі, як наповнювачі, розріджувачі, загусники, стабілізатори, барвники, мастила, і завдяки цьому отримують складні багатокомпонентні матеріали - реактопласти. В якості сполучних використовуються олігомери з молекулярною масою до 1500, в молекулі яких є більше двох функціональних груп. На початковій стадії отримання матеріалів і виробів термореактивні сполучні мають низьку в'язкість, що полегшує процес формування виробів.

Різниця в хімічній структурі термореактивних пов'язуючих, широкий спектр зміцнювачів, ініціаторів затвердіння, що модифікуються добавками, використання різних наповнювачів дозволяють отримувати конструкційні матеріали з дуже великим діапазоном міцності, електротехнічних і інших експлуатаційних характеристик. Залежно від типу сполучного реактопласту підрозділяються на фенопласти, амінопласти, поліефірні, епоксидні, поліуретанові, кремнійорганічні і інші пластики.

Фенолоальдегідні смоли - це продукти взаємодії фенолів і альдегідів, найчастіше за все фенолу і формальдегіду. Залежно від умов отримання кінцеві продукти розрізняються за хімічною будовою (рис. 1.2), молекулярною масі і здатністю до затвердіння. Розрізняють два види фенолоформальдегідних смол (ФФБ) - резольні (термореактивні смоли, отримують при надлишку формальдегіду) і новолачні (термопластичні смоли, отримують при надлишку фенолу).

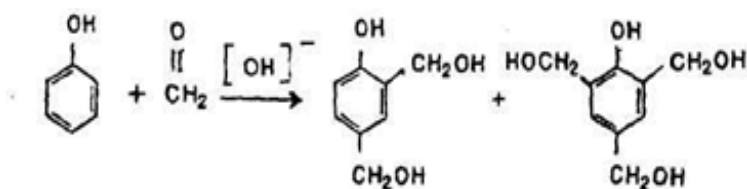


Рисунок 1.2. – Хімічна будова фенолоальдегідної смоли [3]

У не затверділому стані фенолформальдегідні смоли представляють собою тендітну прозору аморфну масу, що переходила при 60 – 120 °С в рідкий стан. Властивості резольних смол з часом змінюються, а наволочні смоли під час відсутності вологи при зберіганні стабільні.

Максимальна температура затвердіння смол лежить в діапазоні 140 – 200 °С. Продукти затвердіння смол тендітні матеріали з некристалічній структурою, що володіють високими характеристиками міцності, електроізоляційними, антикорозійними властивостями. Резити стійкі до дії більшості кислот. Температура деструкції фенолформальдегідних смол вище 300 °С.

Переробка фенолформальдегідних смол при виробництві полімерних композиційних матеріалів включає просочення тканих і нетканих волокнистих наповнювачів, паперу та інших матеріалів. Після затвердіння композиційні матеріали обробляються методами прямого і литтєвого пресування, лиття під тиском, екструзії, вакуумного формування.

Епоксидні смоли (ЕС) - мономерні, олігомерні або полімерні розчинні сполуки, до складу молекул яких входить не менше двох епоксидних або гліциділових груп. Отримання ЕС проводиться при конденсації в лужному середовищі епіхлоргідріна або діхлоргідріна гліцерину з сполуками, що містять рухливі атоми водню (фенолами, амінами, гликолями, кислотами), а також при прямому епоксидуванню не граничних з'єднань органічними пероксикислотами або пероксидом водню [4]. Реакція між епіхлоргідрином і діфенілопропаном (рис. 1.3) призводить до отримання діановії ЕС:

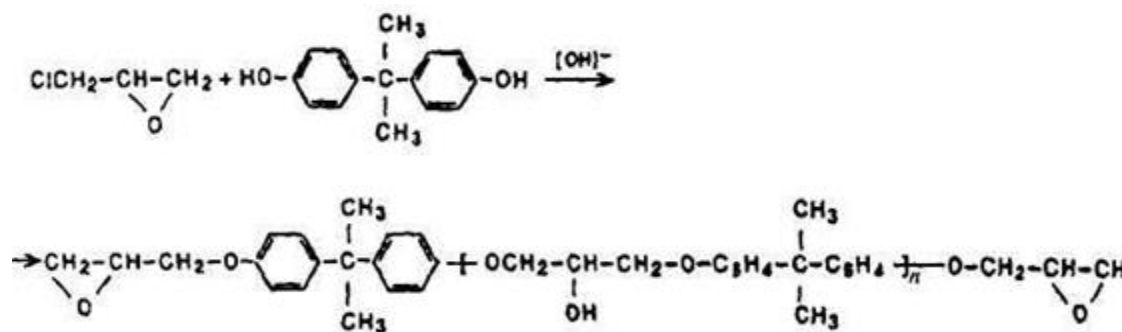


Рисунок 1.3. – Реакція між епіхлоргідрином і діфенілопропаном [3]

Не затверділі смоли є термопластичними густими рідинами або крижкими твердими речовинами. У молекулах діанових смол є функціональні групи двох типів - епоксидні і гідроксильні. Тому затвердіння цих смол можуть бути сполуки різних класів, а режими затвердіння варіюються в широкому діапазоні: як без підведення тепла, при нагріванні, у воді.

Технологія отримання матеріалів на основі епоксидних смол полягає в просочуванні волокон, тканин, паперу; засихання і обробці методами прямого пресування, контактного формування, вакуумного формування та ін. Температура переробки становить 20 – 180 °С.

Поліетилен (ПЕ) - один з найбільш широко застосовуваних полімерів. Промислово випускається поліетилен низького тиску (ПЕНТ) і поліетилен високого тиску (ПЕВТ). Міцність, теплостійкість і хімічна стійкість ПЕНТ вище, ніж ПЕВТ. Газопроникність, навпаки, вище у ПЕВТ. Деструкція поліетилену протікає при температурі вище 290 °С, а сонячна радіація веде до термостаріння. При кімнатній температурі поліетилен стійкий до дії розбавлення сірчаної та азотної кислот, концентрованої соляної, фосфорної і плавикової кислот, володіє низьким водопоглинанням. ПЕ переробляється литтям під тиском, екструзією, пресуванням, добре зварюється і механічно обробляється.

Поліпропілен (ПП) має високу зносостійкість і добре витримує вигин. За відсутності повітря термодеструкція проявляється при 300 °С. Поліпропілен стійкий до дії багатьох кислот і лугів. Концентрована сірчана кислота слабо

руйнує поліпропілен при кімнатній температурі і катастрофічно при мінус 60 °С. До дії сильних окислювачів поліпропілен нестійкий. Поліпропілен переробляється литтям під тиском, екструзією, вакуумформованням, роздуванням, зварюванням, пресуванням, напиленням, обробляється різанням.

Полістирол (ПС) - крихкий полімер, що володіє високою радіаційною стійкістю, легко піддається старінню. Термічна деструкція починається при температурі вище 266 °С. Полістирол стійкий до дії деяких мінеральних і органічних кислот, лугів, трансформаторного масла, руйнується при концентрованій азотній і оцтовій кислоті.

Технології переробки полістиролу: литтям під тиском, екструзією, вакуумноформовання.

Поліаміди (ПА) в нашій країні добре відомі по маркам «нейлон-7», «найлон-11». Отримують за допомогою іонної полімеризації капролактаму ($NH-CO-(CH_2)_6$). Для полімерів характерні висока атомна міцність, зносостійкість, ударна в'язкість, низька гігроскопічність, стабільність властивостей при підвищених температурах, різко виражена температура плавлення. Поліаміди стійкі до дії органічних розчинників.

Основні способи отримання виробів з аліфатичних поліамідів - лиття під тиском і екструзія. Ароматичні поліаміди переробляються методом прямого пресування з попереднім підігрівом.

Полііміди (ПІ) отримуються поліконденсацією піромеллітової кислоти і діамінодіфенілоксида. Фізико-механічні властивості поліімідів стабільні в широкому температурному інтервалі (від мінус 200 до плюс 300 °С). Для виробів, виготовлених із поліімідів, характерні висока стабільність розмірів, низька повзучість при високих температурах, висока термостійкість і стійкість до дії γ - випромінювання, швидких електронів і нейтронів. Розбавлені кислоти на полііміди впливу майже не роблять. Мають низький коефіцієнт тертя по сталі (0,05 – 0,17). Прес-порошки поліімідів переробляються методами прямого і компресійного пресування, лиття під тиском, гарячого пресування.

Таким чином, для більшості термопластів характерна більш висока продуктивність і більш інтенсивні методи переробки, формування деталей менш енергоємне, можливо формування великої, складної конфігурації деталей; можлива вторинна переробка, знижена горючість, димовиділення при горінні і токсичність продуктів горіння, висока стійкість до випромінювання, поєднання високої міцності і теплостійкості (поліефірсульфон, поліефірїмідів, поліфеніленсульфід) з високою ударною міцністю і тріщиностійкістю.

Еластомери застосовуються в промисловості переробки пластмас найчастіше як високомолекулярні пластифікатори для зниження крихкості склоподібних або кристалічних полімерів.

Застосування еластомерів в складі полімерних композиційних матеріалів ускладнено зниженим опором теплового старіння і термоокисленої деструкції. Крім того, підвищена липкість, деформованість еластомерів зазвичай не дозволяють випускати їх в гранульованому вигляді (лише деякі еластомери доступні сьогодні в вигляді гранул), що також ускладнює їх використання.

Проте, застосування еластомерів як компонентів сумішевих композиційних матеріалів (в тому числі конструкційних) безперервно розширюється.

Керамічні матриці. В даний час розрізняють звичайну і технічну кераміку.

До складу звичайної кераміки входять силікати (SiO_2), тому промисловість, що випускає звичайну кераміку, називають силікатною. У техніці використовується кераміка спеціального призначення (технічна кераміка), до складу якої входять різні оксиди, карбіди, нітриди, борида, силіциди, сульфід.

Відомі приклади розробки кераміки змішаного типу. Наприклад, на основі двох типів кераміки - іонної оксидної AlO_3 і ковалентного безкисневого Si_3N - створений ефективний матеріал, сіалон, загальна формула $Si_{6-x}Al_xN_{8-x}O_x$, з якого виготовлені дослідні зразки блоків циліндрів двигунів внутрішнього згорання, газотурбінних лопаток.

У деяких випадках до класу керамічних матеріалів умовно відносять і матеріали, звані кермет - керамікометалічні матеріали типу оксид алюмінію - метал (наприклад хром). Крім оксиду алюмінію можуть бути використані оксиди магнію, берилію, титану, цирконію, хрому та інших елементів. Металевою складовою слугує нікель, кобальт, залізо, деякі металеві сплави. Іноді під керамікою розуміють тверда речовина, що характеризується неметалевою природою зв'язку і неpolімерною структурою, тобто керамікою є все, що не є металом і полімером.

За функціональним призначенням розрізняють механо-, термо-, електро-, магнето-, опто-, хемо-, біо-, ядерну та надпровідних кераміку. Основними властивостями механокераміки є твердість, міцність, модуль пружності, в'язкість руйнування, зносостійкість, коефіцієнт лінійного термічного розширення, термостійкість. Забезпечують ці властивості з'єднання Si_3N_4 , ZrO_2 , SiC , TiB_2 , ZrB_2 , TiC , TiN , WC , B_4C , Al_2O_3 , BN . Термічної кераміці властиві жаропрочність, жаростійкість, вогнетривкість [5]. Як керамічною складовою використовують SiC , TiC , B_4C , TiB_2 , ZrB_2 , Si_3N_4 , BeS , CeS , BeO , MgO , ZrO_2 , Al_2O_3 , TiO .

Як приклади керамічних матеріалів, успішно застосовуються на практиці: карбід кремнію (захист графіту від окиснення, вкладиші сопел порохових і деяких рідкорективних двигунів), карбід титану (жароміцні матеріали для виготовлення деталей реактивної і атомної техніки), нітрид бору (обтічників антен і електронного обладнання літальних апаратів).

Основними перевагами керамічних матеріалів є високі температури плавлення, висока міцність властивостей в умовах дії стискаючих напруг, хімічна стійкість в агресивних середовищах. До сучасних керамічних матеріалів конструкційного призначення пред'являються і інші вимоги: забезпечення високих характеристик міцності властивостей, підвищеної ударної в'язкості і інших властивостях, характерних для металевих конструкційних матеріалів.

Основним недоліком конструкційної кераміки, стримуючим її широке поширення як конструкційний матеріал, є низький рівень тріщиностійкості (в'язкості руйнування). Низька тріщиностійкість кераміки обумовлена високою

міцністю хімічних зв'язків, характерних для неї. Матеріали, що володіють нековалентним типом зв'язку, як правило, є міцними і крихкими.

Створені композиційні матеріали з комбінованими матрицями, які складаються з двох і більш різних за хімічним складом шарів. Композиційні матеріали з комбінованими матриці називаються поліметричними. Для них характерний більш широкий перелік корисних властивостей.

У матриці рівномірно розподілені наповнювачі, які називаються ще зміцнювачами, так як вони грають головну роль в підвищенні міцності матеріалу. Наповнювачів ще називають армуючими компонентами.

Властивості композиційного матеріалу залежать від форми або геометрії, розміру, кількості і характеру розподілу наповнювача. За формою наповнювачі поділяють на три основні групи (рис. 1.4): нуль вимірні, одновимірні, двовимірні.

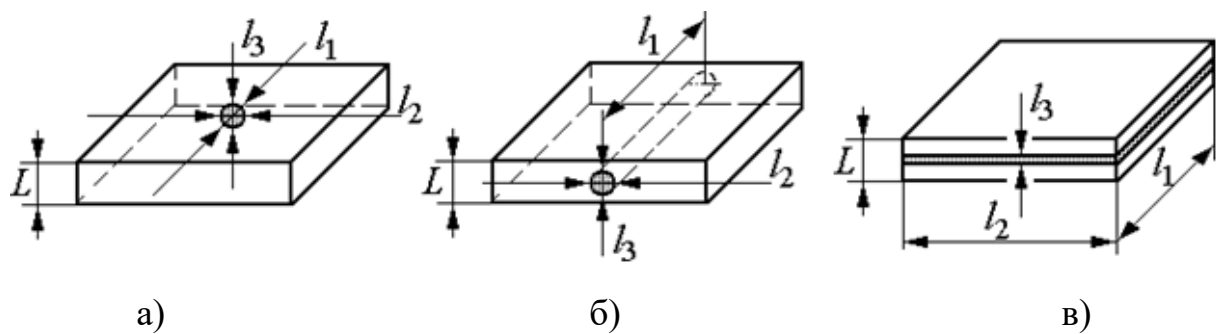


Рисунок. 1.4. – Форми наповнювачів:

а – нуль вимірні; б – одновимірні; в – двовимірні;

l_1, l_2, l_3 – розміри наповнювача; L – товщина матриці [6]

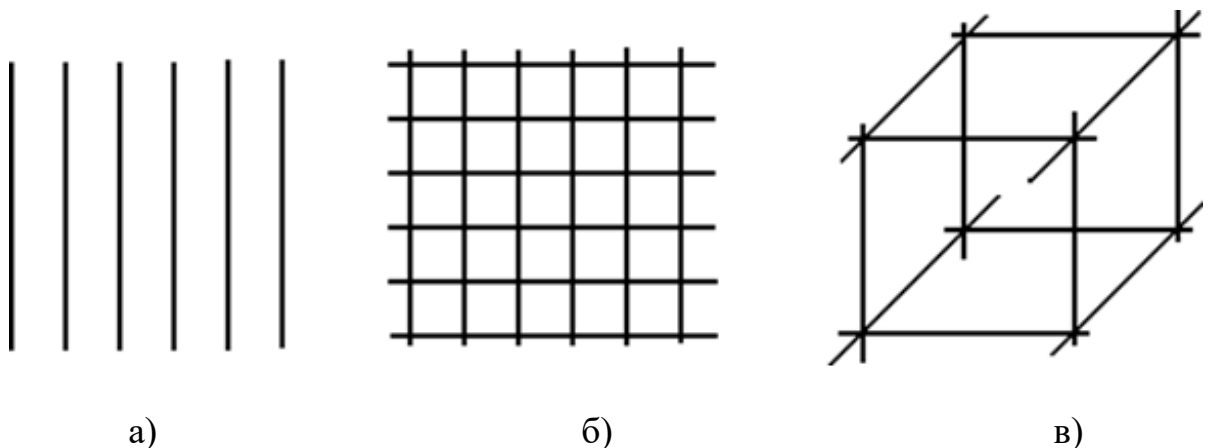


Рисунок. 1.5. – Схеми армування:

а – одновісна; б – двовісна; в – трьохвісна [6]

За формою наповнювача композиційні матеріали поділяють на дисперсно-зміцнені, волокнисті і шаруваті. Дисперсно-зміцненими називають композиційні матеріали, зміцнені нуль вимірними наповнювачами, а волокнисті - зміцнені одновимірними, шаруваті - двовимірними наповнювачами.

За схемою армування (рис. 1.5) волокнисті композиційні матеріали поділяють на три групи: з одноосьовим, двохосьовим і трьохосьовим армуванням. При одноосьову армуванні вміст наповнювача становить 1 – 5 %, при двохосьовому - 15 – 16 %, при трьохосьовому - більше 15 %. У шаруватих композитах в якості наповнювача застосовують плоскі аркуші паперу, тканини або азбесту.

Для розширення комплексу властивостей або посилення якої-небудь властивості можуть бути використані одночасно наповнювачі різної форми або наповнювачі однієї форми, але різного складу. Композиційні матеріали, які містять два і більше різних наповнювача, називають поліармованими.

Дисперсно-зміцнений композиційний матеріал. В дисперсно-зміцнених матеріалах основним елементом є матриця, яка несе навантаження. Дисперсні частинки (рис. 1.6) гальмують в металі рух дислокацій, збільшуючи його міцність при нормальній і підвищеній температурах. Перевагою таких матеріалів на відміну від волокнистих є ізотропність властивостей.

Висока міцність досягається при розмірі частинок зміцнення 0,01 – 0,1 мкм. Об'ємний зміст частинок залежить від схеми армування, але зазвичай не перевищує 5 – 10 об'ємних відсотків.

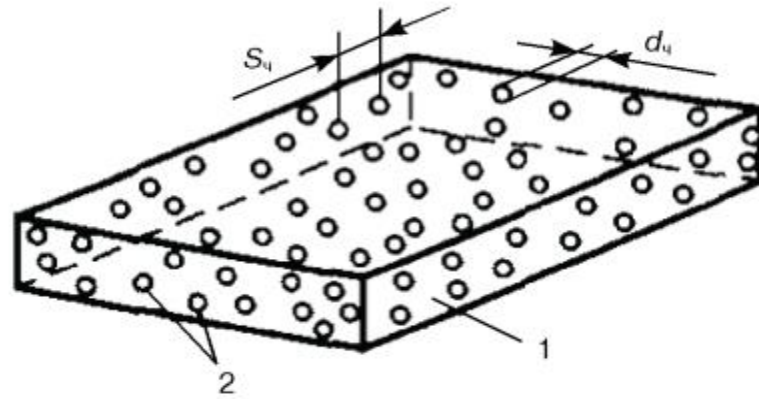


Рисунок. 1.6. – Композит з армуючими частками:

1 - матриця; 2 - армируючі частинки діаметром d_q ;

S_q - відстань між частинками [7]

В якості зміцнюючих фаз використовуються частки тугоплавких фаз - оксидів, нітридів, боридів, карбідів (Al_2O_3 , SiO_2 , BN , SiC). Дисперсно-зміцнені композиційні матеріали в основному отримують порошковою металургією або введенням наповнювачів в рідкий метал перед розливанням.

Найбільш широко застосовуються дисперсно-зміцнені композиційні матеріали на основі алюмінію і нікелю.

Матеріали на основі алюмінію називаються спеченим алюмінієвим порошком (САП) і складаються з алюмінію і лусочок Al_2O_3 (в кількості до 18 %). Матеріал САП (табл. 1.1) характеризується високою міцністю, жароміцністю, корозійну стійкість і термічною стабільністю властивостей. Зі збільшенням вмісту окису алюмінію підвищується міцність, твердість, жароміцність і зменшується пластичність.

З САП виготовляють поршневі штоки, лопатки компресорів, лопаті вентиляторів і турбін, обмотки трансформаторів.

У матеріалах на основі нікелю в якості матриці використовують нікель і його сплави з хромом (до 20 %) зі структурою твердих розчинів. Зміцнювачами слугують частки оксидів торію і гафнію. Найбільше зміцнення досягається при вмісті 3,5 – 4 % окису гафнію: $\sigma_B = 750 - 850 \text{ МПа}$, $\delta = 8 - 12 \%$.

Шаруваті пластики. У шаруватих пластиках наповнювач знаходиться у вигляді листів, тканин. До шаруватим композитам відносяться біметали, що мають в складі два різних види металу з дуже різними коефіцієнтами лінійного розширення α -шар, β -шар (рис. 1.7.). При зміні температури біметали деформуються, і цю деформацію можна точно визначати, тому біметали використовують для виробництва вимірювальних приладів. Наприклад, алюміній і деякі високоміцні алюмінієві сплави мають низьку корозійну стійкість, тому високоміцний алюміній, покритий корозійним алюмінієвим сплавом, володіє одночасно високою міцністю і корозійну стійкість. Можна називати шарувате скло і ламінати на основі пластиків як шаруваті КМ.

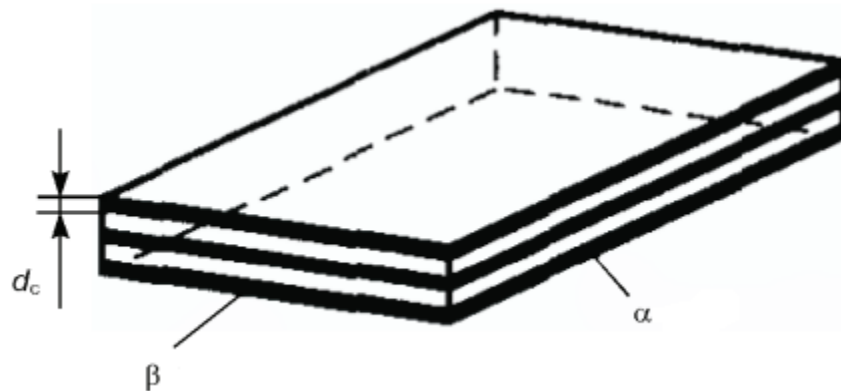


Рисунок. 1.7. – Шаруватий композит:

d_c - товщина шару в шаруватому α - β композити [7]

Дерево-шаруваті пластики (ДШП) складаються з деревної шпони, просоченого фенолоформальдегідною і крезолоформальдегідною смолами. ДШП мають високі фізико-механічні властивості; низьким коефіцієнтом тертя. Недоліком є чутливість до вологи. Гетинакс відноситься до шаруватих композитів і складається з паперу, просоченої смолами (фенолоформальдегідом). Гетинакс має хороші електроізоляційні властивості, високу механічну міцність, але поступається текстолітам.

Текстоліти мають тканину в якості наповнювача, а просочення здійснюється фенолоформальдегідной, кремнійорганічним або епоксидною смолою в залежності від необхідного рівня властивостей матеріалу.

Конструкційно текстоліти (наповнювач - хлопчато-паперова або синтетична тканина, просочена фенолоформальдегідной смолою); вони мають низький коефіцієнт тертя, високу стійкість, працюють в трансформаторному маслі при температурах від -60°C до $+125^{\circ}\text{C}$.

Азбестотекстоліт містить до 43 % сполучного, решта - азбестова тканина. Володіє теплостійкістю до 300°C і механічною міцністю. Застосовують азбестотекстоліт як конструкційний, фрикційний і термоізоляційний матеріал, який витримує протягом 1 – 4 годин температуру $250 - 500^{\circ}\text{C}$, а короткочасно 3000°C і вище. Роблять з азбестотекстоліта лопатки ротаційних бензонасосів і гальмівні колодки. Склотекстоліт має в якості наповнювача скляні тканини, а сполучною є фенолоформальдегідні, кремнійорганічні, епоксидні смоли. Склотекстоліт має високу теплостійкість, морозостійкість, стійкістю до окислювача і іншим хімічних реагентів.

Волокнисті композиційні матеріали. Волокнисті композити (рис. 1.8) мають найчастіше пластичну матрицю, армовану високоміцними волокнами, дротом або кристалами у формі ниток. У цих композитах основні напруги сприймається волокнами уздовж композиту. Волокна забезпечують міцність і жорсткість композиту у напрямку розташування волокон. Механічні властивості і механізм руйнування композиту визначаються співвідношенням трьох параметрів:

- 1) міцністю волокон;
- 2) міцністю і жорсткості матриці;
- 3) міцністю зв'язку волокно-матриця.

Волокнисті композити можна класифікувати за природою компонентів і по типу наповнювача, а також їх розташуванню в матриці. Таким чином, за своєю природою матриці композиту можна виділяти композиційні матеріали на основі полімерів або так званих пластиків; металів і їх сплавів; кераміки; вуглецю. За природою арматури композитів можна виділити наступну класифікацію: склопластики, вуглепластики, боропластики, органопластики, полімери наповнені порошками.

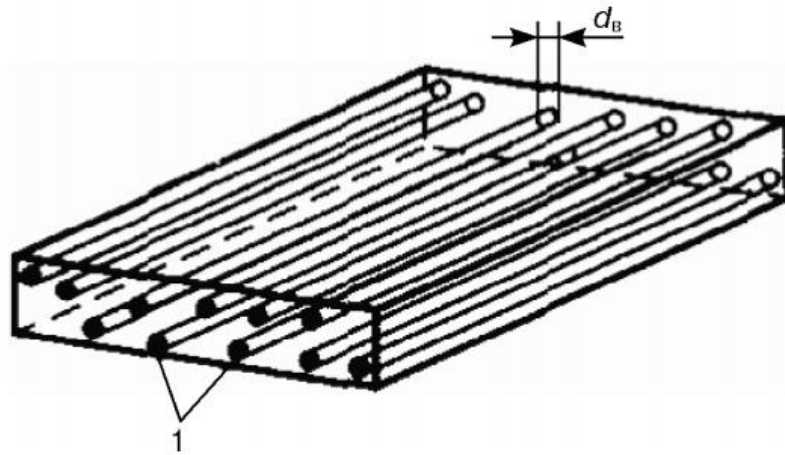


Рисунок. 1.8. – Волокнистий композиційний матеріал:

1 - волокна в матриці, d_v - діаметр волокна [7]

Волокна довжиною 0,2 – 14 мм (короткі волокна) використовують для отримання конструкційних ливарних і екструзійних термопластичних матеріалів, довжиною не більше 1 – 2 мм. Довжиною від 15 до 70 мм (довгі волокна) - для отримання прес-матеріалів (волокнітах і преміксів на основі фенолоформальдегідних і поліефірних смол.

Основні види волокон (вуглецеві, скляні) випускаються круглого перетину діаметром 8 – 20 мкм, а також трикутного, ромбічного та інших форм. Оптимальне значення діаметра волокна d_{opt} залежить від його природи і полімерної матриці, а також від методу формування і розмірів виробу.

Значення параметра для безперервних волокон можна збільшити, використовуючи волокна різних діаметрів (щільні склади) і перетинів (трикутні, квадратні, ромбічні). Полімерні та металеві волокна ущільнюються під тиском, перепрофілюються і значення може досягати 1.

Волокнисті наповнювачі отримують з металу, кераміки, полімерів. Найбільшого поширення для створення ПКМ отримали скляні, вуглецеві, борні і органічні волокна. Способи отримання і характеристики волокон різної природи, що застосовуються для отримання армованих пластиків, будуть розглянуті далі.

Радіопоглинаючі композитні матеріали. Радіопоглинаючі матеріали НВЧ – це матеріали, що забезпечують поглинання електромагнітних хвиль НВЧ діапазону при мінімальному його відбитті. Поширюючись в об’ємі цих матеріалів, електромагнітне випромінювання створює змінне електричне поле, енергія якого перетворюється на теплову енергію практично повністю.

У радіопоглинаючих матеріалах і конструкціях поряд з діелектричними і магнітними мають місце такі явища як дисперсія, дифракція, інтерференція і повне внутрішнє відбиття радіохвиль, що викликають додаткове ослаблення енергії електромагнітних хвиль внаслідок релеєвського розсіювання, складання хвиль в протифазі. Вироби з таких матеріалів сьогодні поглинають потоки електромагнітної енергії з потужністю $0,1 - 8,0 \text{ Вт/см}^2$ в інтервалі робочих температур $60 - 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ при рівні відбитого випромінювання $0,001 - 5 \%$.

Основу радіопоглинаючих матеріалів складають органічні або неорганічні (в основному оксиди і нітриди) речовини в які в якості активної поглинаючої компоненти вводять порошки графіту, металів та їх карбідів.

Гradientні радіопоглинаючі матеріали характеризуються багатошаровою структурою, яка забезпечує задану зміну ефективної діелектричної проникності в товщі матеріалу. Зовнішній шар виготовляють з твердого діелектрика з діелектричною проникністю ϵ близькою до 1 (наприклад з фенольного пластика, зміцненого кварцовим скловолокном), наступні – з діелектриків з більш високою ϵ (наприклад з епоксидної смоли з $\epsilon = 5$ або тієї ж смоли з наповнювачем з $\epsilon = 25$) і порошку поглинача (наприклад графітового пилу). Описана структура сприяє мінімальному відбиттю радіохвиль від поверхні і збільшенню їх поглинання в міру проникнення в глиб матеріалу.

Інтерференційні радіопоглинаючі матеріали зазвичай складаються з підкладки і діелектричних і провідних шарів, що наносяться послідовно один на одний. В якості підкладки використовують металеву пластину або неметалічний матеріал з ϵ близько 100 і тангенсом кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$, близьким до 1. Діелектричний шар, є сполучним і містить в собі поглинач (наприклад оксиди Fe). Провідний шар зазвичай представляє собою металізовані волокна. Така

структура забезпечує зсув фази відбитої в матеріалі хвилі майже на 180°C , що зумовлює її згасання.

Розсіюючі радіопоглинаючі матеріали забезпечують багаторазове відбиття та розсіювання хвиль. Вироби з них найчастіше являють собою порожнисті пірамідальні конструкції з пінополістиролу, внутрішні стінки яких покриті графітом, або труби із склопластиків, покриті зовні шаром SiC .

Керамічні поглинаючі матеріали представляють собою, як правило, щільноспечені матеріали з оксидів металів з низьким значенням електричного опору (наприклад Ti_3O_4 і $(\text{AlTi})_2\text{O}_3$) або оксидів і нітридів B і Al з добавкою металів (W , Mo , Ti , Zr , Hf) або їх карбідів. Такі матеріали мають високі теплопровідність, механічну міцність і термостійкість. Для екранування від радіовипромінювань високої інтенсивності виготовляють багат шарові матеріали з мікросфер оксиду Al і титанату Ba , з'єднаних між собою алюмофосфатним цементом. До групи керамічних радіопоглинаючих матеріалів також відносять щільний піролітичний вуглець.

Феритові поглинаючі матеріали відрізняються великими магнітними втратами, характеризуються високим поглинанням, що дозволяє використовувати їх в якості полегшених елементів, наприклад тонкошарових (до $0,2\text{ мм}$) покриттів з FeO , Fe_2O_3 або MnO . Fe_2O_3 в якості наповнювача та епоксидної смоли в якості сполучної речовини, або плиток, змонтованих на металевому листі та захищених склотканиною або шаром пластмаси.

Широке застосування знаходять композиційні радіопоглинаючі матеріали, матриця яких складається з високомолекулярних полімерних сполук, а наповнювачем є частки феромагнітних матеріалів [8]. Такі матеріали ефективно працюють в якості радіопоглинаючих матеріалів, розташованих на металевих поверхнях. Наприклад в роботі [9] запропоновано в якості наповнювачів композиційних поглинаючих матеріалів для НВЧ діапазону використовувати порошки карбонільного заліза (FeC). Дослідження спектрів комплексних магнітної ($\mu = \mu' - i\mu''$) та діелектричної ($\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$) проникностей композитів з різними коефіцієнтами наповнення на частотах до 18 ГГц показало, що дані

матеріали мають значні магнітні та діелектричні втрати і є перспективними для застосування в НВЧ діапазоні частот. Показано також, що менший коефіцієнт відбиття і більшу ширину смуги поглинання мають двошарові радіопоглинаючі матеріали [10] в порівнянні з одношаровими [11]. Вони складаються з сильно поглинаючого шару, розташованого на металевій поверхні та шару з меншими значеннями магнітної та діелектричної проникності.

Широке поширення отримали радіопоглинаючі матеріали і структури на основі резистивних ниток, розташованих в діелектричній матриці [12]. Особливий інтерес до таких матеріалів і структурах зумовлений можливістю плавної і контрольованої зміни їх електродинамічних і фізико механічних характеристик за рахунок підбору товщини конструкції, геометричних розмірів ниток, концентрації їх в матриці, а також властивостей частинок наповнювача нитки. В роботі [13] дано огляд таких матеріалів, що випускаються зарубіжними фірмами. В [14] проводиться аналіз різних типів композиційних радіопоглинаючих матеріалів на основі волокон з вуглецю, графіту, бору, поліетилену. Експериментальні дані, представлені в [15], дозволяють порівняти матеріали з різними наповнювачами за їх здатністю поглинати і відбивати електромагнітну енергію НВЧ діапазону, а також проаналізовано вплив на їх електродинамічні властивості типу наповнювача, орієнтації волокон і товщини матеріалу. На практиці виявляється, що кращі з цих структур мають або вузьку смугу поглинання при невеликій товщині і масі конструкції, або велику товщину і масу, працюючи в широкому діапазоні довжин хвиль. Резистивна нитка представляє собою багатокомпонентне волокно, в об'ємі якого сформовано електропровідний композит. Провідним наповнювачем є сажа з частинками розміром порядку 300-600 Å. Ці частки містять кристаліти графіту. У зв'язку з цим такі нитки відносяться до широкого класу вуглецево-графітових тіл [16], однак вони проявляють специфічні властивості через особливість будови матеріалу – волокна. На рис. 1.9, 1.10 [17] наведена електропровідна нитка, виконана за допомогою електронного мікроскопа. На рис. 1.9. наведена частина поперечного зрізу нитки, де чітко видно захисну полімерну оболонку і розміщені всередині неї скловолокна з сажею. Рис.

1.10. ілюструє той же зріз нитки але при більш сильному збільшенні. Скловолокно в такій нитці розміщено хаотично з відносним об'ємом вільного міжволоконного простору 30 % і утворюють неоднорідну структуру. Введення наповнювача в об'єм нитки є складним процесом, і тому реальна резистивна нитка є комбінацію ланцюгових, плоских або об'ємних структур [18]. Цим пояснюється неоднорідність резистивної нитки і, як наслідок, розкид її параметрів. Оболонка нитки має хороші механічні, і температурні характеристики.

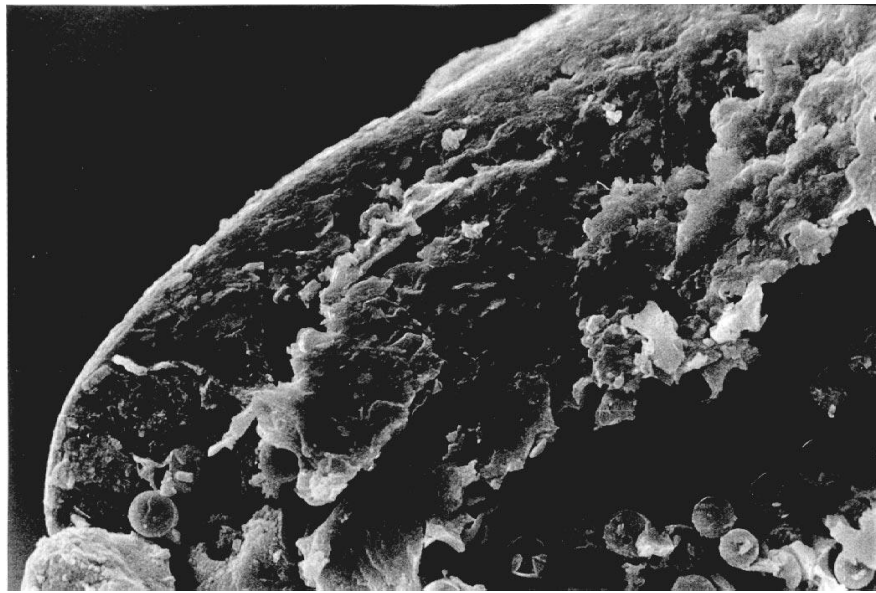


Рисунок. 1.9. – Частина поперечного перерізу електропровідної нитки [17]

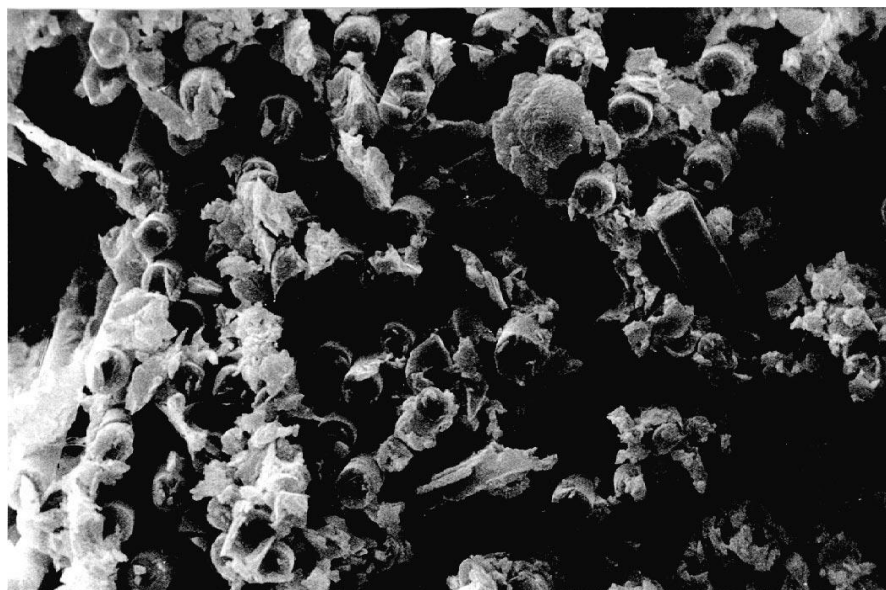


Рисунок. 1.10. – Група скловолокон з сажею всередині електропровідної
нитки [17]

Досліджувана в роботі нитка в цілому є провідним середовищем. Крім того, просторові розміри неоднорідностей багато менше довжини хвилі робочого діапазону. Це дозволяє надалі описувати резистивну нитку у вигляді суцільного середовища з ефективною питомою електропровідністю і ефективною комплексною діелектричною проникністю.

Велика увага в даний час приділяється створенню широкосмугових поглиначів. Методам розрахунку широкосмугових поглиначів і їх створенню присвячена велика кількість робіт [18]. Запропоновані розрахункові співвідношення для коефіцієнта відбиття пов'язують довжину хвилі, товщину поглинача і ефективні комплексні діелектричні і магнітні проникності. Для розширення робочого діапазону радіопоглинаючих матеріалів використовуються, зокрема, багат шарові структури, стільникові і комірчасті структури. В якості штучних наповнювачів часто використовують провідники різної форми [19].

Дослідження особливостей розповсюдження електромагнітних хвиль через багат шарові і композитні структури, що містять напівпровідники, феромагнетики і діелектрики є актуальними не тільки з точки зору теоретичної фізики, а й у зв'язку з їх широким застосуванням в мікроелектроніці, акустооптиці, оптичній голографії, рентгенівській дифрактометрії та інших галузях науки. Існує велика кількість сучасних штучних матеріалів, що мають шарувату періодичну або композитну структуру, вивчення властивостей і характеристик яких може відкрити шлях до їх практичного використання в нових аспектах.

Прикладом такого роду матеріалів можуть служити манганіти (складні оксиди марганцю), унікальні властивості яких були виявлені близько 50 років тому. До таких властивостей, наприклад, відносяться колосальний магнетоопір і подвійний обмін. В цих матеріалах можуть утворюватися феромагнітні, антиферомагнітні, діелектричні і напівпровідникові фази різної геометричної структури. Також до шаруватих періодичних матеріалів відноситься новий клас

оптичних матеріалів – фотонні кристали, для яких характерна трансляційна симетрія діелектричної проникності з періодом порядку довжини хвилі світла.

Дослідження особливостей розповсюдження електромагнітних хвиль через шаруваті і композитні структури є досить складною аналітичною та чисельною задачею.

В останні десятиліття підвищився інтерес до шарувато-періодичних структур на основі тонких плівок металів, напівпровідників і діелектриків. Дані шаруваті періодичні середовища можуть розглядатися як новий тип штучних матеріалів з новими, унікальними фізичними властивостями.

Також, виявляється, що властивостями таких середовищ можна ефективно керувати за допомогою зовнішніх фізичних впливів (температура, пружні напруги, магнітні й електричні поля). Реакція шаруватих періодичних структур на електромагнітні випромінювання залежить від електричних і магнітних параметрів і товщини шарів. Електричними і магнітними матеріальними параметрами кожного шару є тензори електропровідності, діелектричної та магнітної проникності. Також неослабний інтерес до шарувато-періодичних структур пов'язаний з тим, що в оптичному діапазоні частот і при відповідних товщинах шарів ці структури представляють собою одномірні фотонні кристали, які характеризуються зонним спектром електромагнітних хвиль. Заборонена зона в спектрі електромагнітних хвиль періодичної структури визначається різницею величин діелектричної, магнітної проникності і товщиною окремого шару. Зонний спектр електромагнітних хвиль вже досліджений для деяких шарувато-періодичних структур, наприклад, спектр електромагнітних хвиль структури напівпровідник-діелектрик досліджено в роботі [20]. Спектр та особливості поширення електромагнітних хвиль у шаруватих магнітних фотонних кристалах розглядається в роботі [21]. Методам розрахунку шарувато-періодичних структур, їх спектрів коефіцієнтів відбиття, проходження і поглинання електромагнітних хвиль присвячена величезна кількість публікацій. За останні кілька років з'явилася величезна кількість публікацій по шарувато-періодичним структурам, в яких вивчаються нові фізичні ефекти заломлення хвиль, ефект Вавилова-

Черепкова, ефект Доплера, генерація поверхневих електромагнітних хвиль [22]. Також добре досліджені шарувато-періодичні структури типу феромагнетик-діелектрик, які використовуються в різних магнітооптичних пристроях, що працюють в інфрачервоному та оптичному діапазонах частот [23]. У НВЧ-області шарувато-періодичні структури, що містять магнітовпорядковані середовища, є перспективними для створення покриттів, що поглинають дане випромінювання [24]. Якщо ефективні діелектрична і магнітна проникності середовища рівні, то коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль від шарувато-періодичної структури феромагнетик-напівпровідник повинен бути рівним нулю. Однак, добре відомо, що у феромагнітних речовинах існують магнітні спін-переорієнтаційні фазові переходи, в області яких можливо аномальна зміна фізичних властивостей і параметрів магнетика [25]. Спін-переорієнтаційні фазові переходи в магнетиках можна здійснити за допомогою зовнішніх впливів (зміни температури, пружних напружень, електричного і магнітного полів). Наприклад, в області спін-переорієнтаційного фазового переходу істотно змінюються модулі пружності кристалів, магнітна анізотропія, магнітна сприйнятливість і як наслідок швидкості пружних та електромагнітних хвиль і коефіцієнти відбиття, пропускання та поглинання хвиль.

Широкосмугові радіопоглинаючі матеріали можна створювати на основі багат шарових покриттів з різних матеріалів. За принципом дії вони, як правило, поділяються на кілька груп: – інтерференційні, що використовують інтерференцію падаючої та відбитої хвиль; – розсіюючі, в яких відбита хвиля розсіюється у всіх напрямках; – поглинаючі, в яких енергія падаючих хвиль перетворюється на теплову за рахунок діелектричних і магнітних втрат матеріалу; – комбіновані, що поєднують різні принципи дії в одному поглиначі.

При створенні подібних радіопоглинаючих матеріалів враховуються дві основні умови: узгодження із зовнішнім простором, тобто мале відбиття від зовнішньої поверхні, і повне поглинання енергії хвилі, що пройшла всередину покриття. Найбільш широкосмуговими є поглиначі з комбінованим принципом дії.

Завдання отримання заданого коефіцієнта відбиття в необхідних частотних діапазонах при певних обмеженнях на параметри матеріалів розглядається в роботах [26]. При вирішенні подібних завдань проводиться підбір спеціальних середовищ і розподіл їх електродинамічних і електрофізичних характеристик по фазовому простору матеріалу.

Теоретичне дослідження частотних і польових залежностей коефіцієнтів відбиття електро-магнітної хвилі від поверхонь деяких феро- і антифероелектриків було проведено в ряді робіт [27]. В роботі [28] аналітично і чисельно був досліджений коефіцієнт відбиття електро-магнітної хвилі від поверхні напівбезмежного феромагнітного діелектрика, пластини феромагнітного діелектрика і структури пластини феромагнітного діелектрика – напівбезмежний немагнітний метал з урахуванням магнітопружної, електромагнітнospінової, акустoeлектромагнітної взаємодій і релаксації в спіновій підсистемі.

В роботі [29] запропонована методика проектування багат шарових радіопоглинаючих матеріалів, яка дозволяє виконати розрахунок оптимальних широкосмугових поглиначів з урахуванням частотної дисперсії діелектричної та магнітної проникностей матеріалів шарів.

В НВЧ області властивості полярних рідин (води, спиртів або їх сумішей) дозволяють створювати поглиначі, в яких робочим середовищем є водяно-спиртові суміші [30].

Перспективними також є матеріали з магнітодіелектричними втратами [31]. Багат шарові поглиначі з використанням феритів або феромагнітних матеріалів мають дуже широку смугу поглинання при достатньо малому коефіцієнті відбиття. Наприклад, тришаровий поглинач [32] забезпечує коефіцієнт поглинання -10 дБ в діапазоні частот $5 - 40$ ГГц при товщині 2 мм. Даний матеріал виконаний на основі волокон, наповнених карбонільним залізом. Широка смуга поглинання забезпечується плавною зміною комплексної діелектричної проникності та комплексної магнітної проникності по товщині поглинача.

Якщо збільшувати число шарів при відповідному розширенні діапазону, то за своїми властивостями багатошарові поглиначі будуть близькі до поглинача градієнтного типу. У поглиначі градієнтного типу використовується поступова зміна від низької провідності вільного простору на зовнішній поверхні поглинача до більш високої провідності на його задній стороні. Такі поглиначі можуть мати більш широку смугу поглинання при малій величині коефіцієнта відбиття. Проте, з практичної точки зору вони найбільш складні у виготовленні. Методики розрахунку градієнтних структур приведені в роботах [33].

Добре відомо, що негладка (рифлена, гофрована, вкрита дрібними конусами) зовнішня поверхня поглинача зменшує коефіцієнт відбиття електромагнітного випромінювання. Такий же ефект досягається при текстуруванні внутрішніх шарів багатошарового покриття.

Найпростіший варіант текстурування – створення внутрішніх неоднорідних по товщині шарів або формування неплоскої межі розділу середовищ. Більш складний варіант – створення декількох внутрішніх шарів, що представляють собою дифракційні решітки [34]. Застосування частково селективних поверхонь у внутрішніх шарах багатошарового поглинача дозволяє розширити робочий діапазон частот, оскільки в цьому випадку з'являється можливість одночасної реалізації поглинання, дифракції та інтерференції електромагнітної хвилі. У роботі [35] проведено розрахунок структур багатошарових діелектричних покриттів. Коефіцієнт відбиття запропонованих структур менше -20 дБ в діапазоні частот $18 - 36$ ГГц. Для розширення смуги робочих частот у роботі [36] пропонується в якості поглинаючих компонентів використовувати суміш феритового порошку і провідних волокон.

Матеріали, що містять металеві провідні включення складної форми: провідні кільця, омега-частинки, одинарні і багатозахідні спіралі [37]; діелектричні включення з великою діелектричною проникністю [38], мають унікальні характеристики у НВЧ-діапазоні. Наприклад, можливий прояв сильної дисперсії та отримання більших значень діелектричної проникності. Такі включення формують систему еквівалентних резонансних контурів з широкою

смугою поглинання. Широка смуга обумовлена двома чинниками. По-перше, незважаючи на те, що металеві включення мають розміри набагато менше довжини падаючої хвилі, вони є резонаторами з малою добротністю, тобто мають широку смугу поглинання. По-друге, такі включення утворюють систему пов'язаних резонаторів, що значним чином розширює смугу поглинання.

При наявності ниткоподібних металевих включень композитний матеріал набуває додаткової ефективною поляризованості, що резонансно залежить від частоти поля. В роботі [36] показано, що середовище, що містить елементи з кільцевих провідників має діаманітні властивості і великі магнітні втрати в широкому діапазоні частот. Використання як наповнювача у вигляді металевих спіралей [39] сприяє зменшенню коефіцієнта відбиття електромагнітних хвиль через додаткові зв'язки між електричними і магнітними полями. Перевагою кіральних середовищ [40] є можливість збільшення ефективною магнітної проникності без застосування важких магнітних матеріалів.

Поглиначі з геометричними неоднорідностями мають значні розміри, але в них найбільш просто реалізується широка смуга робочих частот при малому коефіцієнті відбиття.

До особливо перспективних слід віднести гранульовані матеріали, що представляють собою наноструктурні композити, в яких металеві феромагнітні наночастинки з аморфною або кристалічною структурою розташовані в діелектричній матриці [41].

Матеріали з керованим поглинанням і відбиттям електромагнітної хвилі останнім часом привертають велику увагу, так як знаходять широке застосування у вимірювальній та контрольній техніці, техніці зв'язку та радіолокації, медицині. Створювати такі матеріали можна, наприклад, шляхом синтезу композиту, що складається з немагнітної матриці, в яку вкрапляються магнітні частинки. Одним з переваг таких матеріалів є можливість простого керування їхніми параметрами шляхом зміни концентрації впроваджуваного компонента в композит. Особливо цікаві, як з наукової, так і з практичної точки зору, наноструктурні композити, у

яких в діелектричну матрицю поміщаються магнітні наночастки. При цьому виникає реальна можливість створення радіопоглинаючих матеріалів з низьким коефіцієнтом відбиття електромагнітної хвилі високих частот [42].

Діелектричні матриці з включеними в них дрібними феромагнітними частинками знаходять широке застосування як поглиначі [43], а також як гіротропні заповнювачі хвильоводів і резонаторів у різних невзаємних пристроях НВЧ-техніки [44].

Існують також системи класифікації композитів за розмірами і формою включень, за матеріалом матриці, за матеріалом наповнювача.

За розмірами наповнювача розрізняють макро - (>100 нм) та нанокомпозити ($1 - 100$ нм). Залежно від форми наповнювачі поділяють на типи: дисперсні наповнювачі та неперервні волокна і тканини. За формою включень композити поділяють на волокнисті (включення у формі волокон, ниток зі співвідношенням довжини до діаметру волокна >1000), шаруваті, дисперсійні (з довільною формою включень при дотриманні співвідношення довжини включення до середнього діаметру або товщини <1000) та змішаного типу (при наявності різних форм-факторів наповнювача). За матеріалом матриці композитів поділяють на полімерні, цементні, вуглецеві, керамічні та металеві.

1.2. Методи виготовлення волокон і композиційних матеріалів

Провідне становище серед композиційних матеріалів на основі синтетичних полімерів займають армовані пластики, головними компонентами яких є волокна і полімерна матриця. Основне механічне навантаження несуть волокна, і вони, головним чином, визначають міцність і жорсткість матеріалу. Порівняльна характеристика волокон приведена в табл. 4.

Таблиця 1.2. – Порівняльна характеристика волокон

Властивості	Волокно			
	Скляне	Борне	Вуглецеве	Арамідне
Механічні властивості				
Питома міцність	Дуже висока	Висока	Середня	Висока
Питомий модуль	Низький	Високий	Середній	Високий
Опір удару	Задовільний	Високий	Поганий	Високий
Подовження при розриві	Високе	Низьке	Середнє	Середнє
Теплофізичні				
Стабільність	Відмінна	Відмінна	Середня	Відмінна
Теплопровідність	Низька	Середня	Висока	Низька
Коефіцієнт лінійного температурного розширення	Дуже низький	Дуже низький	Середній	Середній
Демпфуюча здатність	Задовільна	Висока	Добра	Відмінна
Виробничо-технологічні				
Найменший радіус вигину	Дуже великий	Малий	Малий	Малий
Чутливість до пошкоджень при переробці	Середня	Середня	Висока	Низька

Можливість переробки в стрічки, тканини	Добра	Погана	Добра	Добра
Вартість	Низька	Висока	Помірна	Помірна

Для виробництва полімерних композиційних матеріалів частіше застосовують скляні, вуглецеві, борні і органічні волокна.

Скляні волокна. Склопластики є одними з найбільш вживаних композиційних матеріалів, що зумовлено їх високими властивостями і відносно невисокою вартістю. Для виробництва склопластиків використовуються скляні волокна різного типу. Основу скла становить SiO_2 . Температура плавлення діоксиду кремнію дуже висока, для її зниження в скло можуть бути введені різні добавки, що змінюють при цьому властивості кінцевого продукту. Скло - це аморфний матеріал, який не має кристалічної будови. Широку поширеність скляних волокон зумовлює їх спектр переваг:

- відносно невисока щільність волокон;
- високий рівень міцності в умовах дії напруг, що розтягують, питома міцність (відношення межі міцності до щільності) скловолокна вище, ніж сталевого дроту;
- хороші електроізоляційні властивості;
- волокна не горять і не підтримують горіння;
- можливість експлуатації при підвищених температурах;
- низький коефіцієнт лінійного температурного розширення і високий коефіцієнт теплопровідності;
- хімічна стійкість, стійкість до дії грибків, бактерій і комах;
- підвищена вологостійкість, збереження високих характеристик міцності властивостей в середовищах з підвищеною вологістю.

Скляні волокна використовуються в вигляді як безперервних ниток, так і різаного (штапельного) волокна.

Технологічний процес отримання волокна полягає в підготовці кварцового піску, вапняку, борної кислоти, глини, вугілля, флюорита і інших компонентів, їх перемішуванні і плавленні в високотемпературних печах (температура плавлення приблизно 1260 °C). Розрізняють одно- і двостадійні процеси отримання скловолокна. При одностадійному процесі розплавка скла надходить безпосередньо в обладнання, що дозволяє отримувати скляну нитку, пряжу, ровинг або різане волокно. Схема одностадійного процесу приведена на рис. 1.11.

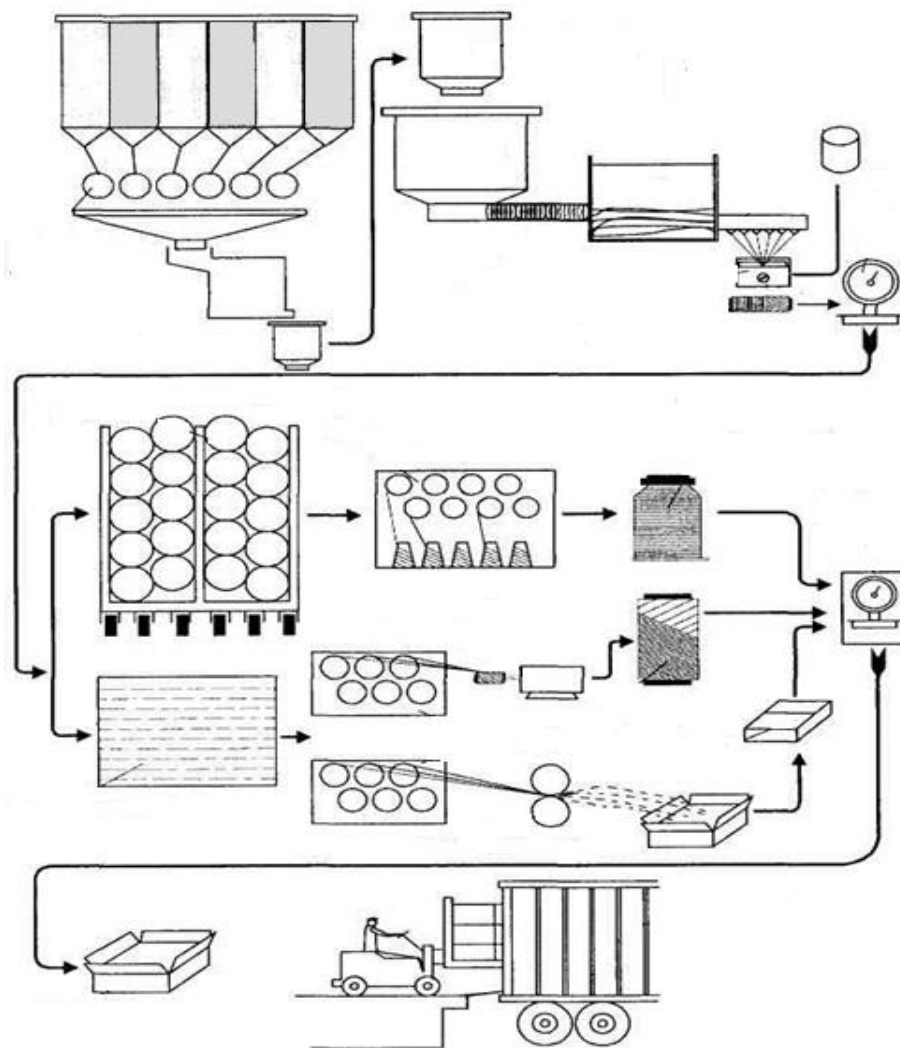


Рисунок. 1.11. – Схема одностадійного процесу отримання скловолокна [45]

Елементарні волокна об'єднують в нитки і пропускають через пристрій, в якому на нитку наноситься спеціальне покриття - замаслювання, що підвищує компактність нитки і захищає її від механічного впливу. Зібрані в єдиний пучок елементарні волокна називають джгутом або стренгами. Залежно від потреби відбувається переробка скловолокна в пряжу, ровинг або штапельне (різане) волокно.

При реалізації двухстадійного процесу розплав спочатку переробляється в склосфери, які потім надходять в плавильні печі і далі переробляються в кінцевий продукт (рис. 1.12).

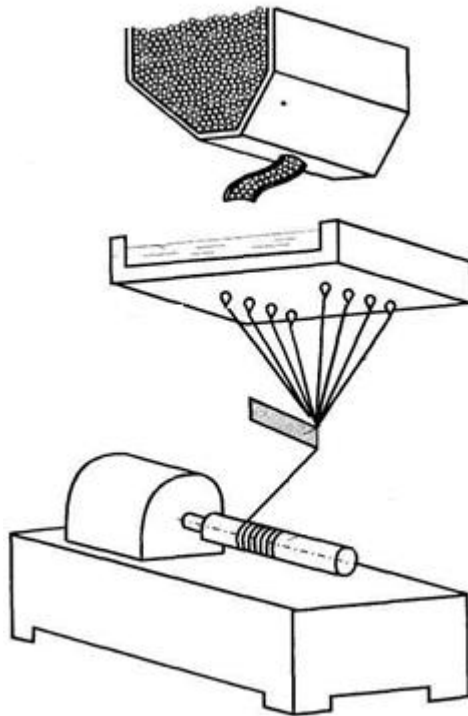


Рисунок. 1.12. – Схема отримання скловолокна з скломаси [45]

При виробництві скляних волокон використовують два типи замаслювачів, що запобігають стирання волокон при їх транспортуванні і подальшій переробці.

Одні з них, технологічні замаслювачі, застосовують тільки на стадії переробки волокна. Перед виготовленням композиційного матеріалу технологічні замаслювачі змивають або видаляють шляхом нагрівання волокна до 1400 °С. В якості технологічних замаслювачів застосовують парафінову емульсію, матеріали

на основі крохмалю. Для того щоб забезпечити хороші адгезійні властивості скляних волокон, іноді після видалення технологічних замаслювачів на їх поверхню наносять спеціальні матеріали, звані аппретами, що сприяють створенню міцного зв'язку на границі між волокном і полімерною матрицею.

Інший тип замаслювачів - активні замаслювачі - виконують подвійну функцію. Вони одночасно оберігають поверхню волокна від механічного впливу і покращують адгезію між склом і полімерною матрицею. Активні замаслювачі з поверхні скловолокна будуть збережені.

Властивості скла визначаються їх хімічним складом. Типовими марками скла вважаються марки *A, C, E, S*. Найбільш поширені високолужні (натрієві, темно-зелені) скла. Наявність великого вмісту лугу визначає їх невисокі електричні властивості.

Вугцеві волокна. Унікальним видом зміцнюючих волокон є вугцеві волокна (ВВ). Обсяг застосування вугцевих волокон при виготовленні композиційних матеріалів постійно зростає, що пояснюється високим рівнем їх властивостей:

- за питомими показниками вугцеві волокна перевершують всі жаростійкі волокна;
- межа міцності високомодульних ВВ становить $2,5 - 3,5 \text{ ГПа}$;
- модуль пружності дорівнює $200 - 700 \text{ ГПа}$;
- щільність вугцевих волокон ($1600 - 1800 \text{ кг/м}^3$) нижче щільності графіту (2260 кг/м^3), що пов'язано з великою пористістю волокон і їх менш досконалою структурою;
- висока хімічна стійкість до дії більшості агресивних середовищ характерна для ВВ.

Залежно від умов обробки вугцеві волокна діляться на карбонізованого і графітозованого.

Температура термічної обробки карбонізованого волокон становить $900 -$

2000 °С, вміст вуглецю в них - 80 – 99 %.

При отриманні графітізованих волокон температура термообробки досягає 3000 °С. Вуглецю в них міститься більше 99 %. Для проведення графітозації, як правило, використовують карбонізовані волокна.

Виробництво вуглецевих волокон засноване на нагріванні полімерів в інертному середовищі та їх термічній деструкції.

Карбонізація і графітизація проводяться в вакуумі, в різних контрольованих середовищах (метан, азот, аргон), а також у вугільній, коксовій і графітової засипках. Під час розкладання полімерів утворюються летючі продукти і залишається твердий коксовий залишок. Перетворення органічних волокон в вуглецеві волокна пов'язано з протіканням складних реакцій, кардинальною зміною структури при збереженні елементів первісного полімерного скла.

Для отримання ВВ використовують тільки волокнисті полімери, що не плавляться при термічній обробці і забезпечують в кінцевому продукті високий вихід по вуглецю і високі механічні властивості. До таких полімерів відносять поліакрилонітрильні волокна, гідратоцелюлозні волокна, багаті вуглецем пеки (звичайні і мезофазних) і органічні волокна, отримані з фенольних смол.

З поліакрилонітрильних волокон отримують високоміцні високомодульні ВВ. Перевагами цього виду сировини є великий вихід по вуглецю і більш проста технологія (більш низька температура нагріву матеріалу). Недолік їх використання полягає у виділенні отруйної речовини - синильної кислоти. Гідратоцелюлозні волокна позбавлені цього недоліку, крім того вони дешевше, тому широко використовуються для виробництва вуглецевих волокон. Технологічний процес отримання волокон з гідратцелюлозної ниток включає стадії текстильної підготовки матеріалу, окислення, карбонізації, графітизації.

Текстильна підготовка розчинниками або поверхнево речовинами необхідна для видалення вологи, неорганічних домішок і органічних речовин, в тому числі і замаслювачів. Після сушіння целюлози на стадії окислення при

температурі 350 – 400 °С спостерігаються великі втрати маси матеріалу і в результаті в залишку міститься не більше 60 – 70 % вуглецю. Далі при температурі 900 – 1500 °С здійснюється карбонізує волокон. Матеріал ще більшою мірою збагачується вуглецем. Остаточна стадія термічної обробки волокон, графітизація, реалізується в середовищі аргону і триває всього лише кілька хвилин. Початкова температура цієї стадії визначається кінцевою температурою карбонізації, а кінцева температура становить приблизно 2600 – 2800 °С. Зміст вуглецю у волокні після закінчення графітизації перевищує 99 %. При поєднанні процесу, отримують волокна з поліпшеними міцності і пружними властивостями.

Борні волокна. Борні волокна, що володіють високою міцністю і високими значеннями модуля пружності, були отримані методом хімічного осадження з газової фази в 1959р. Їх використовували в основному в якості армуючих волокон для виготовлення важко навантажених несучих конструкцій літаків. У порівнянні з іншими типами армуючих волокон борні мають високу жаросткість (180 ГПа) і вважаються одними з найбільш ефективних зміцнювачем композиційних матеріалів.

Основу технології отримання борних волокон становить осадження бору на вольфрамову нитку. Отримують бор з суміші водню H_2 і трихлорида бору BCl_3 за такою реакції:



Бор осідає в газовому реакторі довжиною близько 2 м на вольфрамову нитку діаметром приблизно 12 мкм, розпечену електричним струмом (рис. 1.13). Температура нагріву нитки становить приблизно 1350 °С. Швидкість осадження бору при використанні такого реактора невисока і складає приблизно 0,9 кг в тиждень. При осадженні бору розкладається тільки 2 % BCl_3 , після чого не прореагувавший хлорид бору конденсує при мінус 80 °С. Пари хлористого водню які утворилися збирають, а водень або випускають в атмосферу, або знову

включають в технологічний цикл отримання борного волокна.

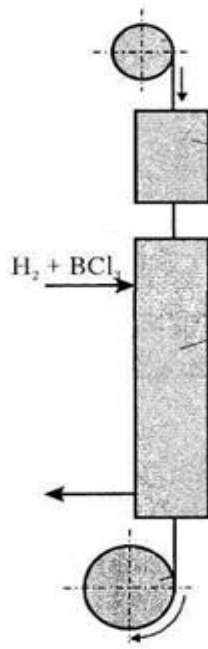


Рисунок. 1.13. – Схема установки для виробництва безперервного борного волокна [45]

У міру осадження бору на вольфрамову нитку електричний опір волокна змінюється, тому змінюється і температурний профіль волокна по довжині реактора. Для того щоб його вирівняти, застосовують дво- або багатостадійну схему підведення електричного струму. Обов'язковою умовою технологічного процесу є підтримання оптимальної швидкості осадження кристалів бору. Якщо швидкість осадження більше або менше оптимальної, то властивості міцності одержуваних волокон знижуються. Межа міцності боровольфрамових волокон при розтягуванні перевищує 3000 МПа.

Боровольфрамові волокна відрізняються високою вартістю, що пов'язано з цінністю вольфрамової нитки. Ця обставина диктує пошук більш дешевих матеріалів для основи. Зокрема, розроблено технологію використання в якості основи більш дешевого вуглецевого волокна. Отримані боровуглецеві волокна мають більш низький модуль пружності в порівнянні з боровольфрамовими. Значні обсяги випущених борних волокон переробляються в безперервну стрічку.

Органічні волокна. Органічні арамідні і поліетиленові волокна в

основному використовуються для виробництва полімерних композиційних матеріалів. Арамідні волокна відносяться до класу ароматичних поліамідних матеріалів (рис. 1.14):

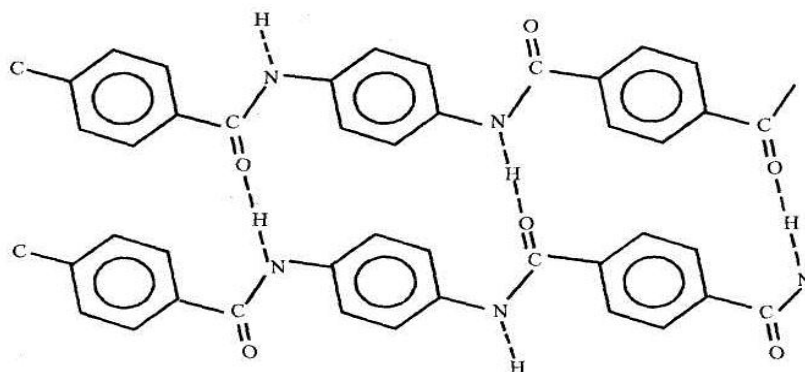


Рисунок. 1.14. – Хімічна будова арамідних волокон [45]

Вперше вони з'явилися в 1971р. під торговою маркою «Кевлар». Волокна «Кевлар-29» випускаються у вигляді технічних ниток різного призначення і використовуються переважно при виробництві кабелів і канатів, для виготовлення автомобільних шин. Волокна «Кевлар-49» виробляють у вигляді пряжі, ровінгу і тканин і використовують для виготовлення підлог, дверей, перегородок літаків і вертольотів. Ці матеріали знаходять застосування при виготовленні корпусів ракетних двигунів, захисних касок, куленепробивних жилетів, човнів, хокейних клюшок і іншого спортивного спорядження. При виробництві полімерних композиційних матеріалів в якості матричного матеріалу частіше використовуються епоксидні або поліефірні сполучні.

Перевагами цих волокон є високі механічні властивості в широкому діапазоні температур і хороша хімічна стійкість. У поперечному напрямку взаємодія здійснюється за допомогою водневих зв'язків, а в поздовжньому напрямку реалізуються ковалентні зв'язку макромолекули. Таким чином, волокна мають високу анізотропію механічних властивостей: високою поздовжньої і низькою поперечної міцністю.

Хімічний склад і структура арамідних волокон визначають їх унікальні властивості. Вони володіють найвищими серед органічних волокон значеннями

міцності властивостей і модуля пружності: при щільності волокон приблизно 1440 кг/м^3 межа міцності при розтягуванні складає $2700 - 3300 \text{ МПа}$, максимальний модуль пружності $96,5 \text{ ГПа}$ і приблизно 128 ГПа .

У порівнянні зі скляними і вуглецевими волокнами арамідні волокна є більш пластичними. Їх подовження при розтягуванні складає приблизно $2 - 4 \%$. Недоліком арамідних волокон є сорбування вологи, в результаті чого властивості знижуються на $15 - 20 \%$.

Отримання арамідних ниток здійснюють сухо-мокрим способом. Розчин очищеного полімеру в сильній кислоті при $50 - 100 \text{ }^\circ\text{C}$ екстрадується через філь'єру прядильної головки і потрапляє в повітряний прошарок товщиною $5 - 19 \text{ мм}$. Діаметр одиночного волокна становить приблизно 12 мкм . Далі волокна проходять через ванну з холодною водою (температура нижче $4 \text{ }^\circ\text{C}$). Нитка яка сформувалася після зміцнення намотується на приймальну бабину.

Іншими органічними волокнами, використовуваними у виробництві ПКМ, є поліетиленові, перевагою яких є низький рівень щільності (970 кг/м^3). При цьому волокна типу «Спектра» (США), «Дайнема» (Нідерланди), «Текмілон» (Японія) мають упругі властивості на рівні арамідних волокон.

Співвідношення між властивостями різних типів армуючих волокон, що застосовуються для виробництва композиційних матеріалів, показані на рис. 1.15 і в порівнянні з металевими волокнами - в табл. 1.3.

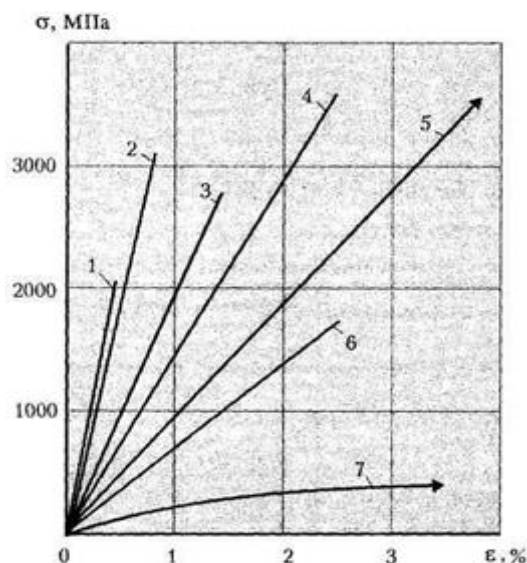


Рисунок. 1.15. – Залежність напруги від деформації для різних армуючих

волокон: [45]

- високомодульна пряжа з вуглецевих волокон (Е, 414 ГПа),
- бороволокно (Е, 379 ГПа),
- високоміцна пряжа з вуглецевих волокон (Е, 262 ГПа),
- ровинг з волокна «Кевлар-49» (Е, 131 ГПа),
- ровинг з S-скловолокна (Е, 82,7 ГПа),
- ровинг із скловолокна (Е, 68,9 ГПа),
- волокно «Номекс»

Міцність волокон «Кевлар-49» в поздовжньому напрямку унікально навіть у порівнянні з неорганічними армуючими волокнами.

Таблиця 1.3. – Властивості різних армуючих волокон

Марка волокна	Міцність, ГПа	Модуль пружності, ГПа	Щільність, г/см ³	Діаметр волокна, м
Метал	2-3	200	7,8	3-25
Скло	3,5-4,6	72-110	2,5-2,9	80
Ароматичний поліамід	3,8-5,5	120-185	1,43-1,47	10-12
Полібензтіазол	3,0-3,3	335	1,5	—
Поліетилен	2-3,5(7)	50-125(200)	<1	30-35
Високоміцний вуглець	3,6-7,2	300	1,8	5-10
Вуглецевий високомодульний	2,5-3,25	500-800	1,8-2,2	5-10
Оксид алюмінію	2,2-2,4	385420	3,95	10-25
Карбід кремнію	3,1-4,0	410-450	2,7-3,4	100-140
Бор	3,45	400	2,6	100-200

Таким чином, властивості високоміцних і високомодульних вуглецевих і деяких полімерних волокон перевершують характеристики сталевих. Для вуглецевих і органічних полімерних волокон характерні низька щільність, висока питома міцність при розтягуванні і високий опір динамічному навантаженню.

Об'єднання зміцнюючих елементів. Моноволокна, отримані різними методами, можуть бути безпосередньо використані для зміцнення композиційних матеріалів. Однак часто волокна об'єднуються в пряжу.

Пряжею називається нитка з волокон, з'єднаних за допомогою крутіння. Пряжа буває однорідною, тобто отриманої з однакових волокон, і змішана (з суміші різних волокон). Для оцінки лінійної щільності волокон або ниток часто використовують позаштатну одиницю - текс (мг/м) - відношення маси нитки (волокна) до довжини.

Пряжа може бути використана для армування композиційних матеріалів у вигляді ниток, а також у вигляді тканин.

Тканини, отримані при ткацькій переробці ниток і волокон, є результатом закономірного переплетення поздовжньо розташованих елементів і елементів поперечного розташування. За конструктивною ознакою розрізняють матеріали з полотняним, ситцевим, сатиновим, саржевим і трикотажним типом переплетення (рис. 1.16).

Основними технічними характеристиками тканин є склад волокна, вид переплетіння, спосіб обробки, ширина, товщина, маса квадратного метра, щільність тканини, розрив навантаження, подовження при розриві.

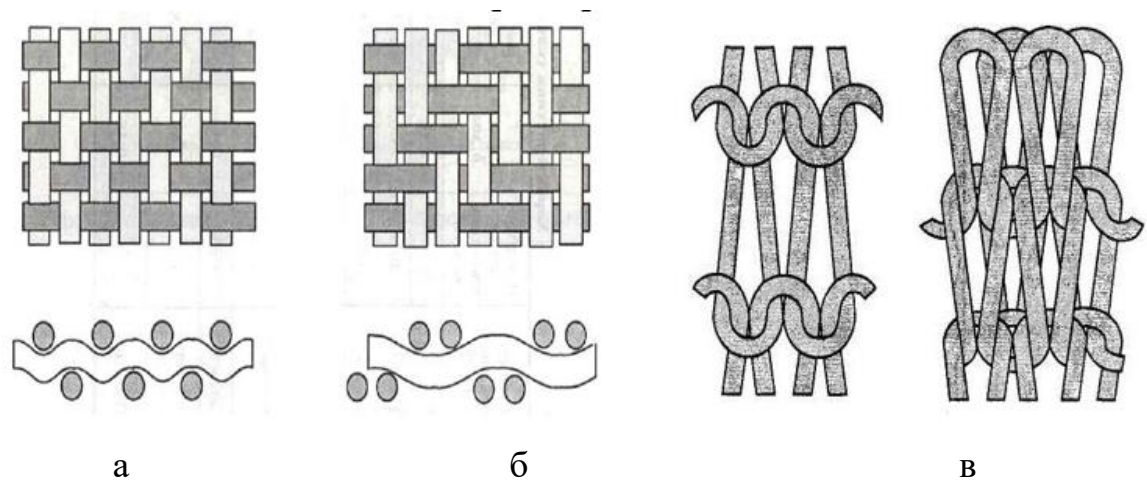


Рисунок. 1.16. – Схеми плетіння: полотняне (а), саржеве (б), трикотажне (в) [45]

Недоліком матеріалів (тканин і сіток), одержуваних способом ткацької переробки, є необхідність застосування тільки досить пластичних волокон і пряжі. У місцях контакту елементів основи і качки відбувається деформація матеріалу, утворюються дефекти, що знижують механічні властивості композиційних матеріалів. Ширші можливості використання волокон і пряжі реалізуються при отриманні виїзних, трикотажних сіток.

Зміцнюючі волокна можуть бути об'єднані також і в неткані матеріали, в яких відсутня їх закономірна орієнтація. Розроблено методи рідинного, повітряного, гравітаційного. Наприклад, основою для отримання повсті методом рідинного войлокування слугує суспензія коротких волокон, залита в бак, з якого вона надходить на сітку, покриту фільтрувальним папером. Далі з обсягу матеріалу видаляється рідина, лист зажимається валками і при необхідності запікається в печі.

1.3. Застосування композиційних матеріалів

Область застосування композитних матеріалів на полімерній основі постійно розширюється. Конструкції із полімерних композитів використовуються в якості несучих елементів і деталей машин, літальних апаратів, водних і наземних транспортних засобів, протезів, триває впровадження полімерних матеріалів у будівництво. Важливе місце займають вони серед конструкційних матеріалів нових видів техніки. Поступове витіснення полімерними композитами класичних конструкційних матеріалів (деревини, сталей, металевих сплавів і звичайних видів кераміки) обумовлено поєднанням в них цілого ряду практично важливих якостей. По-перше, це високі питомі значення деформативних і міцності, реалізовані в таких широко відомих сучасних композиційних матеріалах на полімерній основі, як скло, вугле-, боро- і органопластів. По-друге, хімічна і корозійна стійкість, а також широкий спектр електрофізичних і теплових властивостей полімерних композитів. По-третє, їх висока економічна ефективність як матеріалів, вироблених з дешевих видів сировини. Нарешті, висока технологічність полімерних композитів при застосуванні їх в габаритних виробках різних геометричних форм. За сукупністю всіх цих показників композиційні матеріали на полімерній основі успішно конкурують з класичними конструкційними матеріалами.

Композиційні матеріали з свинцевої матрицею, армовані вуглецевими волокнами, застосовують в хімічній промисловості при виготовленні батареї і акумуляторів, в будівництві, в виробках, що працюють на тертя. Ці матеріали мають особливе значення, так як вони набувають конструкційних властивостей. Використання композиційного матеріалу дозволяє значно знизити масу конструкції, що вкрай необхідно для аерокосмічної техніки. В даний час ведуться дослідження зі створення з КМ деталей компресора, наприклад лопаток, турбін.

Одним з ефективних способів використання фторопласта для підшипників є застосування фторопластових композицій з наповнювачами. У цьому випадку збільшується зносостійкість підшипника і знижується коефіцієнт тертя, збільшується теплопровідність, зменшується лінійне розширення.

Композиційні матеріали з титанової матрицею є перспективними жароміцними матеріалами для авіакосмічної техніки і знайдуть застосування в нових конструкціях реактивних двигунів, де виникає необхідність в матеріалах, жароміцними до температури експлуатації до 800 °С.

Використання композиційних матеріалів для захисту від корозії в різних технологічних процесах в умовах промислового виробництва стимулювало розвиток методів випробувань цих матеріалів на вплив корозійних середовищ.

Кераміко-пластикова броня використовується для захисту кабіни пілотів на військових гелікоптерах. Грудний щиток спільно з броньованим сидінням екіпажу гелікоптера дозволив забезпечити круговий захист в секторі обстрілу гелікоптера 360 градусів. Сьогодні вже і елементи корпусів вертольотів роблять з композитів.

Застосування композиційних матеріалів в елементах кузова вантажного вагона сприяє збільшенню корозійної стійкості без використання дорогого покриття, що дозволяє знизити частоту проведення ремонтів або уникнути їх. Крім цього, застосування нових матеріалів забезпечує зниження маси тари вагона.

Собівартість типовою волокнистого полімерного композиції в середньому в 3 рази більше собівартості сталевих листа, але при цьому ефективність застосування композиційного матеріалу вище завдяки його міцності. При виготовленні деталей, до яких пред'являються підвищені вимоги по механічним властивостям, економія досягається за рахунок зниження товщини і маси деталі в порівнянні з металевим виробом. В ході виготовлення деталей складної форми витрати на обробку і забарвлення можуть бути значно нижче в порівнянні з виробництвом аналогічних комплектуючих із сталевих листа.

Вартість виробництва волокнистої полімерної композиції в значній мірі визначається витратами на необхідне технологічне обладнання, яке в свою чергу залежить від кількості виготовлених виробів. На формування деталей зазвичай витрачається більше часу, ніж на штампування сталевих листів. Однак сумарна вартість обробки металу включає в себе ряд додаткових операцій. Так, внаслідок виключення в ряді випадків робіт зі складання та фарбування композиційний матеріал може мати цінову перевагу. Крім того, при виготовленні конструкцій з металу застосовуються дорогі і трудомісткі операції зі зварювання і зачистки, нехарактерні для неметалічних матеріалів.

Вартість оснащення для формування волокнистої полімерної композиції становить близько 10 % вартості обладнання для обробки сталевих листів. При випуску партії виробів загальна економія може бути тим більш суттєвою, чим вище вартість одиничного виробу. У зв'язку з цим помірні витрати на обладнання в разі застосування волокнистої полімерної композиції дозволяють розглядати композиційний матеріал як найбільш економічний для виготовлення деталей кузовів.

Впровадження композиційних матеріалів на залізничному транспорті можливо тільки при поетапному вирішенні комплексу наступних завдань:

- розробка техніко-економічного обґрунтування застосування нового матеріалу в конструкції вагона;
- визначення нового матеріалу і його характеристик, вибір технології виготовлення;
- розробка конструкції вузлів вагона із застосуванням нового матеріалу.

Можливість застосування боралюмінія в авіакосмічній техніці обумовлена його високою жароміцністю і високим опором повзучості, що визначають ефективність і стабільність, наприклад, таких деталей, як лопатки вентиляторів

двигунів. Поведінка боралюмінія при високих температурах протягом тривалого часу більш складно в порівнянні з поведінкою більшості монолітних матеріалів через, що відбуваються в ньому зміни характеру залишкових напруг, взаємодія між волокном і матрицею і процесів, що протікають окремо.

В якості матриці композиційного матеріалу, вперше застосованого в автомобілебудуванні, була використана поліефірна смола. Вибір цього матеріалу визначався відносною простотою конструювання деталей, низькою вартістю, а також тим практичним досвідом, який був накопичений при випробуванні експериментальних автомобілів і деталей для них, виготовлених ручними методами. Розроблена згодом технологія виготовлення аналогічних деталей шляхом формування на сталевих модельних плитах дозволила випускати серійні партії. Використання поліефірних смол з різними зміцнювачами триває і зараз, причому вдосконалення технології безперервно розширює можливості матеріалу.

З ДШП виготовляють: шестерні, які добре працюють в парі з металевими (при цьому знижується шум); підшипники, які не утворюють задираки на валу; шківів, втулки, корпуси насосів, деталі автомобілів і залізничних вагонів; деталі човнів.

З текстоліту виготовляють безшумні зубчасті і черв'ячні колеса, підшипники ковзання, друковані плати для електротехніки. З склотекстоліту виготовляють друковані плати в радіоелектроніці, цистерни корпусу човнів і катерів, кузова автомобілів, реакційні апарати, насоси, труби.

Поглиначі електромагнітних хвиль сьогодні використовуються в НВЧ техніці для створення безехових камер, у вигляді покриттів металевих поверхонь літаків, танків, ракет і кораблів з метою їх радіолокаційного маскування, захисту робочого персоналу від впливу НВЧ випромінювання, забезпечення електромагнітної сумісності вузлів і блоків високочастотних пристроїв, виготовлення узгоджених навантажень для хвилеводних структур і маскування радіолокаційних об'єктів. В даний час область застосування НВЧ випромінювання розширилася, і воно використовується в пристроях широкого застосування, таких як: мобільні телефони, комп'ютери, фото-і відеокамери. При переході в

гігагерцову область частот забезпечується мініатюрність, мала вага і висока швидкодія цих сучасних апаратних засобів. Розробка таких пристроїв також неможлива без використання нових поглинаючих матеріалів.

Електричні з'єднувачі, які застосовуються для подачі живлення і передачі даних у виробках, призначених для використання в збройних силах і космічній техніці, постійно зменшуються в розмірах і вазі. Багато замовників шукають менші за габаритами, легші і більш гнучкі рішення, які відповідають жорстким індустріальним вимогам по міцності і довговічності. Недавні розробки в області конструктивних рішень і матеріалів дозволили здійснити стрибок у технології виробництва і виконання з'єднувачів, які забезпечують як їх високі технічні характеристики, так і необхідні вимоги щодо захисту навколишнього середовища.

Композити - це основа багатьох сучасних проектів в області розвитку пристроїв з мінімально помітним дією. Одним з них є безпілотні літальні апарати. Композитні матеріали вельми активно використовувалися в їх конструкції, результатом чого стала можливість їх виявлення тільки з близької відстані.

Композитні матеріали широко використовуються в будівництві. Термін матеріали для звичайного нашого розуміння наводить на думку тільки про традиційні матеріали, але в таких областях, як будівництво мостів, залізниць, шляхопроводів полімерні композитні матеріали мають переваги над звичайними матеріалами. Будівництво має розглядати такі проблеми, як різні механічні навантаження, починаючи з захисту обладнання або звуконепроникних стін, і закінчуючи надвисоким тиском, який витримують опори для мостів. Для пошуку рішень, які можна застосувати в цих несхожих ситуаціях, в цивільному будівництві застосовуються очищені пластмаси або композити: зазвичай застосовуються в легких будівельних конструкціях, періодично використовувані в спеціалізованих конструкціях, призначені виключно для великих будівельних конструкцій, наприклад, мостів. Матеріали на основі карбамідних композитів знайшли застосування в будівництві для виготовлення хімічно стійких перегородок, панелей в якості теплоізоляції: підлоги, панелей, у водогосподарському будівництві: колекторні і дренажні труби, водоводи,

трубофільтри. Карбамідні композити мають високу хімічну стійкість в органохімічних агресивних середовищах і повністю відповідають вимогам санітарно-ветеринарних нормам. Карбамідні композити широко застосовуються для отримання колекторних і дренажних труб, плит зрошувальних каналів, гідроізоляційних мастик, використовуваних в умовах засолення ґрунтовими водами. Широке застосування знайшли прес-матеріали (амінопласти) на основі карбамідних смол. Вони застосовуються для виготовлення світлих і забарвлених виробів. При відсутності пігментів виходять прозорі матеріали, пропускають більше 65 % видимого світла.

Висновки до розділу

Серед нових матеріалів особливе місце займають композитні матеріали, що володіють цілим комплексом різних властивостей, раціональне поєднання яких дозволяє отримувати оптимальні конструкції. Для зниження рівня випромінювань використовують матеріали поглинального типу, які дозволяють керувати поглинанням і відбиттям електро-магнітної хвилі і тому привертають до себе велику увагу, так як знаходять широке застосування у вимірювальній та контрольній техніці, техніці зв'язку та радіолокації, медицині.

РОЗДІЛ 2: МОДЕЛЮВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1. Методи розрахунку

Основним завданням при створенні радіопоглинальних структур поглиначів з будь-якою кількістю шарів є дослідження властивостей складових компонентів, що полягає в обґрунтуванні і виборі полімерної матриці і наповнювачів шарів. Ці складові компоненти вибираються для всіх верств структури, відповідно до результатів розрахунку необхідних електромагнітних параметрів ε і μ для будь-якої шаруватої структури. В результаті проведених розрахунків необхідних параметрів вибираються матеріали і компоненти для експериментальних досліджень електрофізичних характеристик матеріалів і покриттів. При цьому необхідно забезпечити мінімальний коефіцієнт відбиття в заданому діапазоні частот, при найменшій товщині і масі матеріалу. Ця умова забезпечує можливість нанесення поглиначів у вигляді покриття на металеві поверхні.

Кількісною характеристикою або критерієм ефективності НДМ є коефіцієнт відображення. Його величина залежить від електромагнітних параметрів ε і μ . Так як ці величини комплексні, то коефіцієнт відображення буде дорівнює нулю за умови рівності дійсної і уявних складових діелектричної та магнітної проникності відповідно. Якщо діелектричні і магнітні втрати відсутні, то матеріал є прозорим для падаючої електромагнітної хвилі, якщо ці втрати мають місце у матеріалі, то хвиля загасає в міру поширення вглиб покриття. При цьому коефіцієнт відображення буде дорівнює нулю, якщо будуть рівні уявні частини ε' і μ'' . З огляду на те, що вони змінюються з ростом частоти, виконання цієї вимоги при створенні поглиначів і покриттів, ефективних в широкому діапазоні частот, можливо тільки за рахунок використання структур які мінливі

до хвильових опорів.

Для отримання мінімального коефіцієнта відображення необхідно виконати умови узгодження середовищ, тобто властивості верхньої зовнішньої частини структури повинні бути максимально наближені до властивостей середовища, з якої падає ЕМХ. У зв'язку з цим, електричні і магнітні властивості матеріалу структури повинні змінюватися по товщині, причому градієнт цих властивостей повинен бути таким, щоб забезпечувати практично повне поглинання електромагнітного випромінювання.

Завдання розробки конструкції НДМ, що має вигляд шарувато-неоднорідної або плавно-неоднорідної структури, може вирішуватися за допомогою аналізу прямої або рішенням оберненої задачі. Під зворотнім завданням синтезу конструкції радіопоглинаючих структури розуміється завдання визначення виду функцій ε' ε'' і μ' μ'' при відомих значеннях гранично допустимого рівня коефіцієнта відбиття і заданого діапазону робочих частот, тобто визначення законів зміни комплексних параметрів ε' і μ'' по товщині структури матеріалу або покриття (якщо шар матеріалу становить єдине ціле з металевою підкладкою), включаючи визначення загальної товщини багат шарової структури з заданою частотною залежністю коефіцієнта відбиття і мінімально можливими по її товщині і масі.

Загальним недоліком всіх методів розв'язання оберненої задачі синтезу є те, що кінцевий результат рішення виходить у формі деяких залежностей електромагнітних параметрів (комплексних значень магнітної і діелектричної проникності) неоднорідного середовища від товщини покриття, а в більш складному випадку і від частоти ЕМХ, які на практиці фізично важко реалізувати. Тому, виходячи з фізично реалізованих матеріалів, синтез радіопоглинаючих матеріалів доцільно проводити, використовуючи рішення прямої задачі. Це завдання формулюється в такий спосіб: по заданим частотним залежностям електромагнітних параметрів матеріалів шарів вибирають оптимальну

конструкцію НДМ і необхідні товщини шарів. Потім здійснюється вибір типу і концентрації наповнення в матеріалах шарів, а також типу сполучного матеріалу або полімерної матриці, при яких електромагнітні параметри матеріалів наближалися до розрахункових значень величин. Потім вимірюють коефіцієнт відображення ЕМХ від матеріалу і проводять коригування моделі, якщо не відповідність розрахункових і експериментальних значень електрофізичних величин перевищує 15 %.

Вирішенню прямої задачі присвячено досить багато робіт, в яких розглянуті питання розрахунку конструкцій чверть хвильових покриттів різного виду, резонансних матеріалів, що містять дипольні решітки; РПМ з неоднорідним видом зміни електромагнітних параметрів по товщині матеріалу поглинальної структури; широкосмугових та багат шарових (в загальному випадку, феромагнітних) радіопоглинаючих покриттів і НДМ.

Існує кілька методів моделювання і розрахунку НДМ. Одним з найпоширеніших методів розрахунку поглинання ЕМХ в шаруватих поглинаючих матеріалах є метод узгодження хвильових опорів або метод імпедансів. Так, наприклад, в разі одношарових матеріалів застосування методу імпедансів дозволяє або розрахунковим шляхом, або графічно визначати необхідні значення електромагнітних параметрів матеріалу шару і його товщину, при яких, на даній частоті коефіцієнт відображення не перевищуватиме заданої величини.

Для багат шарових структур існують рекурентні формули, що зв'язують вхідні характеристики шару з його електромагнітними параметрами, а також з товщиною і вхідними характеристиками попереднього шару. Ці формули можуть використовуватися в якості математичної моделі розрахунку НДМ, і зручні для розрахунків ЕМХ.

Для розрахунку коефіцієнтів відбиття в діапазоні частот доцільно вибрати метод геометричної оптики (МГО), заснований на принципі парціальних хвиль.

У зв'язку з тим, що в реальних умовах електромагнітна хвиля поширюється в неоднорідному середовищі, точне рішення рівнянь Максвелла отримати неможливо. Рішення завдання надзвичайно складне, а при великій

кількості припущень і не дуже точне. Тому найбільш простим є випадок, коли ЕМХ переходить з одного середовища в інше з плоскою межею поділу між ними. Для характеристики кордону розділу вводиться матриця передачі, що включає коефіцієнти передачі та відображення.

Метод геометричної оптики. Одним з найбільш простих методів визначення поля, відбитого від великих в порівнянні з довжиною хвилі тіл, які мають досить гладку поверхню, є метод геометричної оптики (хвильової). Якщо амплітуди векторів E і H і напрямок поширення хвилі практично не змінюються на відстані близько її довжини, то вводиться поняття променів (ліній), дотичні до яких в кожній точці збігаються з напрямом поширення хвилі, тобто, передбачається, що кожній точці променя відповідають певні значення цих векторів.

Метод геометричної оптики є наближенням, так як джерело електромагнітних випромінювань повинно знаходитися на досить великій відстані від поверхні об'єкта, що і має місце при використанні НДМ у вигляді покриттів на поверхнях об'єктів. Отримувані в даному випадку результати будуть близькі до точних.

Нехай на плоску поверхню поглинач НДМ (рис. 2.1), що складається з шару завтовшки d , падає електромагнітна хвиля з навколишнього середовища 1. Розглянемо випадок нормального падіння електромагнітної хвилі, так як при цьому коефіцієнт відображення приймає максимальне значення.

$$\Gamma = |\Gamma| e^{j\psi} = \frac{E_{от}}{E_{пад}} = \frac{Z_0 - Z_{вх}}{Z_0 + Z_{вх}} \quad (2.1)$$

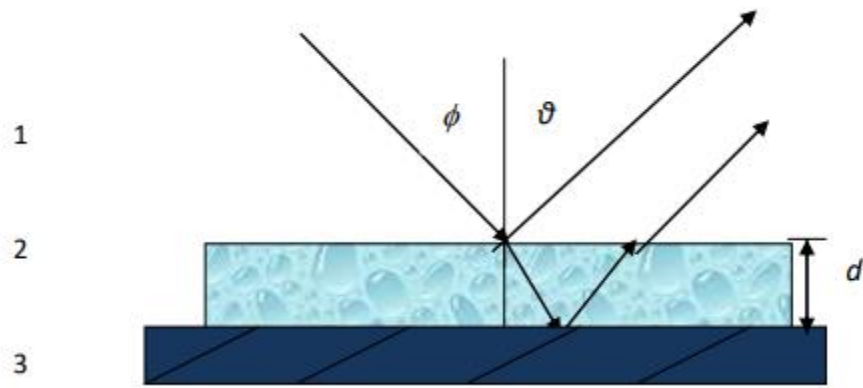


Рисунок. 2.1. – Падіння ЕМХ на поверхню НДМ. [46]

При поширенні електромагнітної хвилі враховуються три середовища:

1 середовище - вільний простір (повітря) $\epsilon_0 = 1$, $\mu_0 = 1$;

2 середовище - поглинаючий шар матеріалу з комплексними параметрами ϵ і μ ;

3 середовище - метал, повністю відображає електромагнітні хвилі.

Відповідно до рис. 2.1, при поширенні електромагнітної хвилі відбуваються такі процеси: відображення і переломлення на кордоні двох середовищ, а також загасання при поширенні електромагнітної хвилі в поглинальних покриттях.

Процеси відображення і заломлення описуються коефіцієнтами Френеля. У разі падіння електромагнітної хвилі нормальної поляризації, тобто коли вектор напруженості електричного поля перпендикулярний площині падіння, коефіцієнти Френеля розраховуються наступним чином:

$$R_{\perp} = \frac{Z_{C2} \cos \varphi - Z_{C1} \cos \theta}{Z_{C2} \cos \varphi + Z_{C1} \cos \theta} \quad (2.2)$$

$$\alpha = \frac{2Z_{C2} \cos \theta}{Z_{C2} \cos \varphi + Z_{C1} \cos \theta} \quad (2.3)$$

де $Z_c = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ - хвильовий опір середовища

У разі падіння електромагнітної хвилі паралельної поляризації, тобто коли вектор напруженості електричного поля паралельний площині падіння,

коефіцієнти Френеля визначаються по аналогічним формулами, так як в разі нормального падіння плоскої хвилі втрачається сутність поняття площини падіння і, отже, зникає різниця між нормально поляризованими і паралельно поляризованими хвилями. Так як в цьому випадку $\varphi=0$ і $\Theta=0$, то коефіцієнти Френеля приймають

$$R_{\perp} = R_{\parallel} = \frac{Z_{C2}-Z_{C1}}{Z_{C2}+Z_{C1}} \quad (2.4)$$

$$\alpha_{\perp} = \alpha_{\parallel} = \frac{2Z_{C2}}{Z_{C2}+Z_{C1}} \quad (2.5)$$

При поширенні всередині шару поглинаючого покриття електромагнітна хвиля зазнає загасання відповідно до закону:

$$H = H_m e^{jkx}, \quad E = E_m e^{jkx}, \quad (2.6)$$

де E_m і H_m - рівень електромагнітної хвилі на вході в поглинаюче покриття; k - хвильове число; x - координата, вздовж якої поширюється електромагнітна хвиля.

Так як електромагнітна хвиля двічі проходить товщину шару покриття, то $x = 2d$. У однорідно-ізотропному середовищі з діелектричними і магнітними втратами параметр k є комплексною величиною:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi c_0}{\lambda_0} \quad (2.7)$$

де c_0 - швидкість світла у вакуумі; λ_0 - довжина хвилі у вакуумі;

Таким чином, формула для визначення хвильового опору набуває вигляду:

$$K = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon\mu} e^{\frac{j\varphi+\psi}{2}} \quad (2.8)$$

Загасання в шарі поглинаючого матеріалу визначається за формулою:

$$A = \left[\frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon\mu} \sin\left(\frac{\varphi+\psi}{2}\right) \right] 2d - j\varphi_c \quad (2.9)$$

Відповідно до рис. 7 коефіцієнт відображення визначається за формулою:

$$\Gamma = \frac{E_{от1} + E_{от2}}{E_{пад}} \quad (2.10)$$

Так як передбачається, що третя середина - метал, то $R_{23} = -R_{23} = 1$

$$\Gamma = \frac{E_{пад}(R_{12} A_2 X_{12} X_{21} X_{23})}{E_{пад1}} \quad (2.11)$$

Наведена методика розрахунку дозволяє розраховувати багат шарові структури НПМ. Вибір одношарової моделі був зроблений, виходячи з вимог технологічності і способу нанесення матеріалу у вигляді покриття на криволінійні поверхні АО і у вигляді конструкційного матеріалу для активної зони випромінювань антенного укриття.

В результаті дослідження встановлено, що тип матеріалу полімерного сполучного композита, тип і склад наповнювача, його дисперсність і концентрація, роблять сильний вплив на поглинаючі властивості елементів антенних укриттів, їх фізико-механічні характеристики.

Панорамні вимірювачі коефіцієнтів стоячих хвиль (КСХ) складаються з вимірювальної лінії з певним перетином хвилеводу і генератора НВЧ. Панорамний вимірювач КСХ дозволяє проводити дослідження коефіцієнтів відображень і проходжень різних матеріалів, і дослідження спектрів магнітної і діелектричної проникності в певному діапазоні довжин хвиль.

Методика призначена для вимірювання частотних залежностей комплексних значень діелектричної та магнітної проникності композиційних

матеріалів за допомогою вимірювальних хвильовдних ліній методом короткозамкнених ліній. Вимірювання проводяться в діапазоні частот (35 - 10,67) ГГц, (або від 12 см до 0,8 см). Визначення зазначених параметрів проводиться непрямым методом на основі використання вимірювальної лінії і відомого методу короткого замикання і холостого ходу (метод «КЗ - ХХ») в разі застосування як коаксіальних, так і хвильовдних ліній передачі електромагнітної енергії.

Вимірювання спектрів діелектричної та магнітної проникності полягає в експериментальному визначенні коефіцієнта відбиття ЕМХ від зразка досліджуваного матеріалу, вміщеного в короткозамкнуту лінію. Короткозамикач може бути в двох позиціях, при яких на одній з площин зразка створюються умови короткого замикання або холостого ходу. Коефіцієнт відображення визначається по вимірним значенням коефіцієнта стоячої хвилі КСХ і зрушенням мінімуму λ .

За знайденим значенням коефіцієнта відбиття обчислюються комплексні значення діелектричної і магнітної проникності.

2.2. Модель поглинальних покриттів на основі композиційних матеріалів.

Математичне моделювання поведінки неоднорідного композиційного середовища здійснюється за допомогою рівнянь з швидко змінними коефіцієнтами, які характеризують властивості окремих компонентів матеріалу. Такий підхід суттєво ускладнює вирішення відповідних крайових задач навіть при використанні сучасних комп'ютерів. З цим пов'язана необхідність створення таких математичних моделей, які призводять до більш простих рівнянь з усередненими коефіцієнтами.

Розвиток пристроїв НВЧ - радіоелектроніки і збільшення їх потужності обумовлює актуальність розробки нових матеріалів для зменшення перешкод і забезпечення електромагнітної сумісності.

Актуальним є отримання композиційних полімерних матеріалів, що дозволяють створювати на їх основі ефективні радіопоглинаючі покриття (НПМ) фільтруючі пристрої з малими втратами в смузі пропускання і великим рівнем поглинання в частотному діапазоні. Радіопоглинаючі покриття створюються на основі композиційних матеріалів із заданими електрофізичними властивостями.

Композиційні матеріали з особливими електрофізичними властивостями є одним з ефективних методів вирішення проблеми електромагнітної сумісності і придушення електромагнітних перешкод, що виникають при функціонуванні радіоелектронних систем (РЕС), в тому числі і радіолокаційних і застосовуються для захисту стаціонарних та рухомих об'єктів від електромагнітного випромінювання.

При розробці і реалізації композиційних полімерних матеріалів необхідно враховувати цілий ряд факторів, які включають їх функціональне призначення, вплив навколишнього середовища, термостабільність і відповідно, термодеструкцію наповнених композицій складів НПМ.

Введення дисперсних наповнювачів в полімерні матриці призводить до суттєвих змін фізико-хімічних і механічних властивостей одержуваних композиційних матеріалів

Падаюча електромагнітна хвиля на металеві поверхні елементів радіоелектронних систем (РЕС), покритих радіопоглинаючими матеріалами ПКМ, в повному обсязі відіб'ються від поверхонь елементів і частково будуть поглинуті всередині структури матеріалу, за рахунок діелектричних, магнітних або спільних втрат.

В якості критерію ефективності поглинання енергії ЕМХ вибирається коефіцієнт відбиття. Чим менше величина коефіцієнта відбиття, тим вище поглинаючі властивості ПКМ, виконаного у вигляді плоскої шаруватої структури і відповідно, знижується рівень відбитої електромагнітної енергії.

Моделювання та розробка ПКМ з особливими електрофізичними властивостями заснована:

- на аналітичних методах розрахунку електродинамічних параметрів;
- на теоретичних і експериментальних дослідженнях фізико-хімічних властивостей використовуваних компонентів і їх вплив на електрофізичні параметри;
- на експериментальних дослідженнях проходження і відбиття електромагнітних хвиль через структуру модельних зразків ПКМ.

Завдання аналізу ПКМ полягає в тому, що при заданому співвідношенні компонентів складу матеріалу, визначаються необхідні дійсні і уявні складові комплексних діелектричних та магнітних властивостей матеріалу, обґрунтовується модель поглинання, проводиться прямий розрахунок коефіцієнта відбиття проходження в заданому діапазоні частот

Найбільш складним питанням при розробці є синтез композиційних матеріалів, відповідно до обраної моделі і розрахунок електродинамічної схеми, що забезпечують найменший коефіцієнт відбиття або найбільший коефіцієнт проходження в заданому частотному діапазоні при заданих конструктивних параметрах.

В задачу синтезу, при заданому частотному діапазоні і максимальному допустимому коефіцієнту відображення і проходження, входить:

- технічна реалізація складів, що забезпечує оптимальні електрофізичні параметри ПКМ;
- строгий контроль розрахункового співвідношення вихідних компонентів в складах і сумішах

Композиційні матеріали, що застосовуються в конструкціях радіопогинаючих елементів повинні володіти еластичними властивостями, необхідними при нанесенні їх на об'єкти, що мають різні радіуси кривизни. Еластичні властивості матеріалів змінюються в залежності від ступеня наповнення, так зі збільшенням концентрації наповнювача пластичні і еластичні

характеристики знижуються.

Технічні вимоги до НПМ. Радіопоглинаючі матеріали і структури знаходять широке застосування в різних пристроях в якості захисних покриттів від електромагнітних НВЧ випромінювань і є поглинаючими елементами конструкцій антенних укриттів. До НПМ пред'являються радіотехнічні та технологічні вимоги відповідно до їх функціонального призначення та областей застосування.

Радіотехнічні вимоги до НПМ

- Коефіцієнт відображення $\Gamma < 10 \%$;
- Коефіцієнт поглинання $\alpha < 20 \text{ Дб}$;
- Діапазон частот $D = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} > 5$

Технологічні вимоги:

- Матеріал повинен мати відносні подовження $\Delta l_0 > 20 \%$;
- Міцність при розтягуванні не менше $\geq - 50 \text{ кг/см}^2$;
- Матеріал повинен витримувати температуру $\geq 170^\circ \text{C}$ протягом 10 – 20 годин без зміни властивостей;
- РПМ повинен бути еластичним (передбачити можливості нанесення на криволінійні поверхні);
- Матеріал повинен бути виготовлений методом холодного затвердіння;
- Матеріал повинен бути екологічно чистим;
- Товщина РПМ не повинна перевищувати $d \leq 3 \text{ мм}$;
- Вага не повинен перевищувати 5 кг на квадратний метр.

Опис моделей розрахунку НДМ одношарової структури. Показником ефективності (або вихідним параметром) композиційних матеріалів, в поле НВЧ є коефіцієнт відбиття Γ . Коефіцієнти відбиття і проходження пов'язані співвідношенням:

$$|T| + |\Gamma| = 1 \quad (2.12)$$

Тому аналіз будемо проводити через коефіцієнт відображення.

У загальному випадку коефіцієнт відбиття є величиною комплексної і визначається як:

$$\Gamma = |\Gamma| e^{-j\psi} = \frac{E_{\text{от}}}{E_{\text{пад}}} = \frac{Z_0 - Z_{\text{вх}}}{Z_0 + Z_{\text{вх}}} \quad (2.13)$$

де $|\Gamma|$ - модуль коефіцієнта відбиття;

ψ - фаза коефіцієнта відбиття;

E – амплітуда відбитої ЕМХ від границі розділу середовищ;

Z_0 - хвильовий опір (імпеданс) вільного простору;

$Z_{\text{вх}}$ - вхідний імпеданс шару матеріалу.

Нехай на діелектричне середовище з втратами 2 товщиною d падає ЕМХ з середовища 1 (рис. 2.2).

Розглянемо випадок нормального падіння ЕМХ. При поширенні електромагнітна хвиля проходить три середовища:

- перше середовище: вільний простір $\varepsilon_0 = 1$
- друге середовище: діелектрик з втратами
- третє середовище може бути вільним простором або поглинаючим.

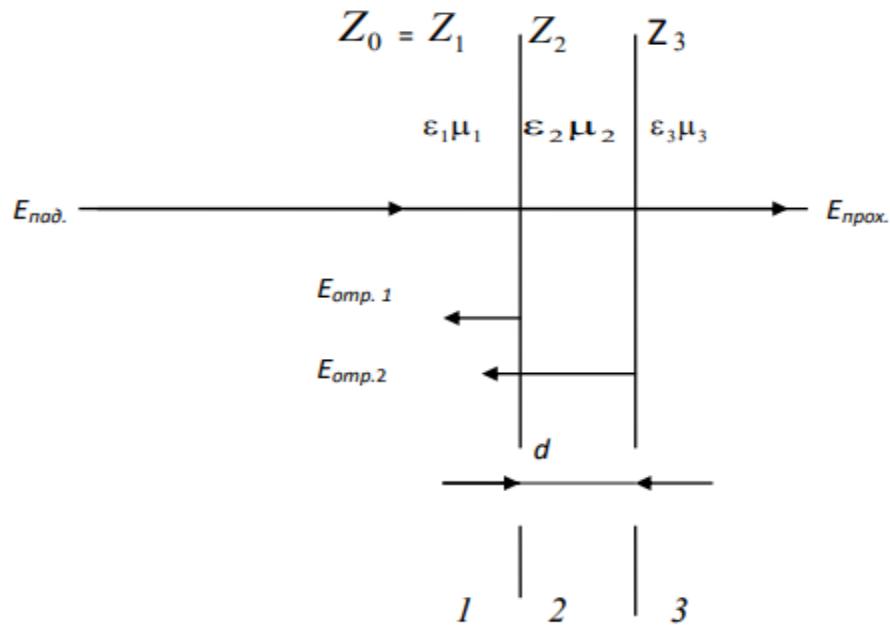


Рисунок. 2.2. – Проходження ЕМХ [46]

На границі 2 - 3 при $Z = d$ матиме місце відбиття і частина відбитої ЕМХ повертається в середовище 1. На цьому кордоні коефіцієнт відображення характеризує відбиту хвилю, яка разом з падаючою хвилею утворює стоячу хвилю в середовищі 2. Вхідний опір при $Z = 0$, якщо спостерігати з середовища 2, дорівнює:

$$Z_0 = \frac{Z_{2(0)}}{H_{2(0)}} = \frac{Z_2 e^{2\gamma d} + \Gamma_{23} e^{-2\gamma d}}{Z_2 e^{2\gamma d} - \Gamma_{23} e^{-2\gamma d}} \quad (2.14)$$

де $\gamma_2 = \alpha_2 + j\beta_2$ - коефіцієнт поширення хвилі в другому середовищі,

$Z_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ - хвильовий опір другого середовища.

Розглянемо три можливих варіанти третього середовища, яка може бути вільним простором, що відбиває, поглинає.

Перший варіант. При третьому середовищі - вільний простір - ЕМХ з

середовища 2 поширюється в середовище 3 без подальшого відображення. Коефіцієнт відображення на кордоні 2-3 дорівнює:

$$\Gamma_{23} = \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2} \quad (2.15)$$

де Z_2 і Z_3 – хвильові опору 2 і 3 середовища відповідно.

Послідовність розрахунку:

1. Визначаємо коефіцієнт відображення в середовищі 2, який в середовищі з втратами носить комплексний характер і може бути представлений через дійсну і уявну частину.

$\text{Re } \gamma = -\beta$ - фазовий коефіцієнт.

$$\beta = \sqrt{\frac{\varepsilon\mu}{2} \sqrt{1 + tg^2\delta} + 1} \quad (2.16)$$

У діелектриках з малими втратами $tg\delta \ll 1$. Тому можна припустити

$$\sqrt{1 + tg^2\delta} \approx 1 + \frac{1}{2} tg^2\delta \quad (2.17)$$

Застосовуючи двічі наближення в вираженні (17), отримуємо:

$$\beta = \omega \sqrt{\varepsilon\mu \left(1 + \frac{1}{8} tg^2\delta\right)} \quad (2.18)$$

де ε - діелектрична проникність другого середовища, $\mu = 1$, якщо середовище не магнітне $tg\delta$ - тангенс діелектричних втрат.

Визначаємо уявну частину $\text{Im } \gamma = -\alpha$ бо коефіцієнт загасання α

$$\alpha = \frac{\omega}{2} \sqrt{\varepsilon \mu t g \delta} = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \quad (2.19)$$

де σ - провідність.

У діелектрику з малим рівнем втрат параметри хвилі (α і β) мало відрізняються від аналогічних параметрів в середовищі без втрат з тими ж значеннями α і μ . Коефіцієнт загасання α є малою величиною і в першому наближенні, не залежить від частоти, тобто дисперсійні властивості проявляються незначно. Визначаємо довжину хвилі в діелектрику

$$\lambda = \frac{v_0}{f} (1 - (1/8 t g^2 \delta)) \quad (2.20)$$

де v_0 - швидкість поширення хвилі у вільному просторі.

3. Визначаємо коефіцієнт відбиття на вхідному кордоні

$$\Gamma = \frac{\Gamma_{12} + \Gamma_{23} e^{2i\beta d}}{1 + \Gamma_{12} e^{2i\beta d}} \quad (2.21)$$

Мінімальний коефіцієнт відображення можна отримати при відповідному виборі товщини d .

Другий варіант. У разі металевого третього середовища електромагнітна хвиля від неї відбивається

$$\Gamma_{23} \approx -1 \quad (2.22)$$

Вхідний опір при $\Gamma_{12} \Gamma_{23} = d$ відповідно дорівнює:

$$Z_0 = Z_2 \tanh \gamma_2 d \quad (2.23)$$

Коефіцієнт відображення діелектричного шару 2 при нормальному падінні ЕМХ буде перетворюється в нуль при виконанні наступного фазового

співвідношення:

$$e^{-i(4\pi/2\lambda)d} = 1 \quad (2.24)$$

де λ - довжина хвилі в середовищі 2.

Це співвідношення буде виконуватися, якщо шар 2 виконаний з діелектрика з малими втратами і загасанням, а товщина шару відповідає непарному кратному $\lambda_2 / 4$.

Коефіцієнт відображення перетворюється в нуль, якщо хвиля, відбиваючись від кордону 2-3, змінює фазу на протилежну.

$$\Gamma_{12} = \Gamma_{23} \quad (2.25)$$

Послідовність розрахунку:

1. Визначаємо фазовий коефіцієнт β .
2. Визначаємо довжину хвилі в НПМ
3. Визначаємо коефіцієнт відображення з урахуванням співвідношення (25) і малого загасання $\alpha \ll 1$

Третій варіант. У разі якщо третє середовище поглинає і через середовище проходить електромагнітна хвиля то вона частково відбивається від кордону 2-3. Узгодження вхідного опору шару матеріалу з вільним простором можна представити таким чином:

$$\frac{\Gamma_2}{\Gamma_1} = \frac{\Gamma_3}{\Gamma_2} \quad (2.26)$$

Шар діелектрика при цьому являє собою довільну лінію передачі енергії при поширенні в ньому ЕМХ. В цьому випадку структуру можна представити

еквівалентною схемою (рис. 2.3).

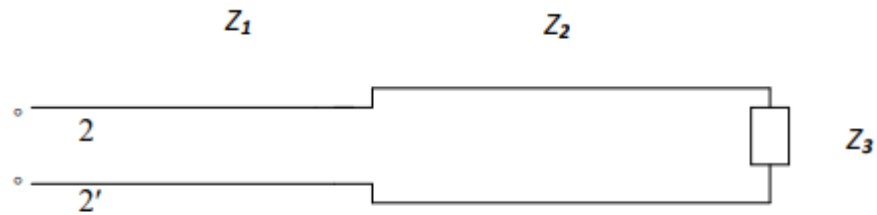


Рисунок. 2.3. – Еквівалентна схема НДМ, двошарової структури [46]

Відповідно до еквівалентної схеми опір третього середовища Z_3 є опором навантаження відрізка довгої лінії. При опорі навантаження в межах варіювання від нуля до нескінченності, падаюча ЕМХ на навантаження або повністю відбивається або поглинається.

Таким чином, перший шар діелектрика, при незначних втратах можна розглядати як пристрій узгодження третього середовища і хвильового опору вільного простору. Комплексний коефіцієнт відображення від перетину еквівалентної лінії ($2 - 2'$) визначається виразом:

$$\Gamma = \frac{1 - Z_0 \gamma_2}{1 + Z_0 \gamma_2} \quad (2.27)$$

де γ_2 - нормована вхідна провідність, еквівалентна лінії $2-2'$.

Нормована вхідна провідність визначається наступним виразом

$$\gamma_2 = \frac{Z_2(1 + i \alpha_2 \operatorname{tg} \beta_2 d)}{(\alpha + i \operatorname{tg} \beta_2 d)} \quad (2.28)$$

де Z_2 хвильовий опір діелектрика середовища 2,

$$\beta_2 = 2\pi \frac{2\pi}{\lambda_0 \epsilon} \quad (2.29)$$

Аналіз поглинальної структури з вхідним шаром зводиться до аналізу параметрів матеріалу і по заданому коефіцієнту відбиття визначається необхідна нормована вхідна провідність за якою визначаються необхідні електромагнітні параметри и товщина структури НДМ.

Послідовність розрахунку:

1. Визначаємо фазовий коефіцієнт;
2. Визначаємо довжину хвилі в речовині;
3. Визначаємо загасання в шарі;
4. Визначаємо оптимальну нормовану вхідну провідність (при варіюванні товщини шару);
5. Визначаємо коефіцієнт відображення структури при оптимальній нормованій провідності.

Висновки до розділу

У зв'язку з тим, що в реальних умовах електромагнітна хвиля поширюється в неоднорідному середовищі, точне рішення рівнянь Максвелла отримати неможливо. Рішення завдання надзвичайно складне, а при великій кількості припущень і не дуже точне. Тому найбільш простим є випадок, коли ЕМХ переходить з одного середовища в іншу з плоскою межею поділу між ними.

Існує кілька методів моделювання і розрахунку електродинамічних властивостей поглинального композитного матеріалу. Одним з найпоширеніших

методів розрахунку є метод узгодження хвильових опорів або метод імпедансів.

Доцільно використовувати метод ефективного середовища оскільки довжина хвилі перевищує розміри металічних частинок.

РОЗДІЛ 3: ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТАЛО-ДІЕЛЕКТРИЧНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

3.1. Методика виготовлення зразків композиційних матеріалів різного складу та структури

Для проведення НВЧ досліджень були виготовлені зразки, що представляли собою діелектричний матеріал (матриця), в об'ємі якого рівномірно розподілені частинки наповнювача (рис. 3.1).

В якості матеріалу матриці використовувалися три матеріали: силікат натрію $Na_2O(SiO_2)_n$ — М1, парафін — М2 та полімер на основі епоксидної смоли — М3 з комплексними діелектричними проникностями при кімнатній температурі $\epsilon_{M1}^* \approx 2,7 - j0,19$ $\epsilon_{M2}^* \approx 2,05 - j0,11$ та $\epsilon_{M3}^* \approx 2,94 - j0,09$ відповідно.

В якості наповнювача були використані нанодисперсні порошки алюмінію та міді, з розміром частинок від 60 до 200 нанометрів.

Процес приготування композиційних зразків полягав в рівномірному механічному перемішуванні порошків матеріалу наповнювача в матеріалі матриці, при кімнатній температурі.

Шляхом введення різної об'ємної частки нанодисперсного металу в матеріал матриці було отримано серію зразків з різною концентрацією металевого наповнювача.

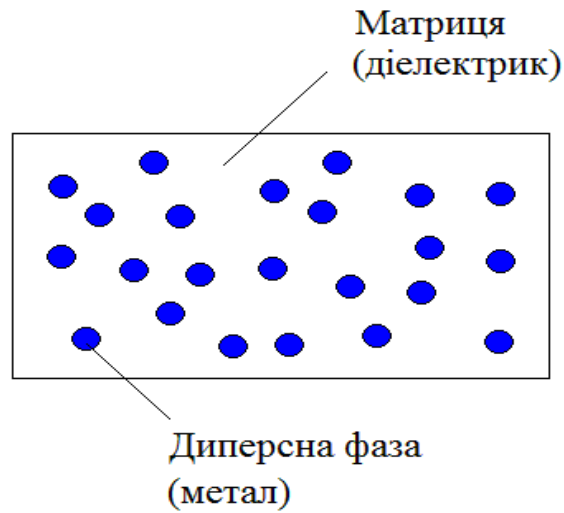


Рисунок 3.1. – Структура досліджуваних зразків.

Структура отриманих зразків досліджувалася методом растрової електронної мікроскопії. Типовий електронно-мікроскопічний знімок зразка *Al-MI* при об'ємній частці металевої фази 0,3 показано на рис. 3.2.

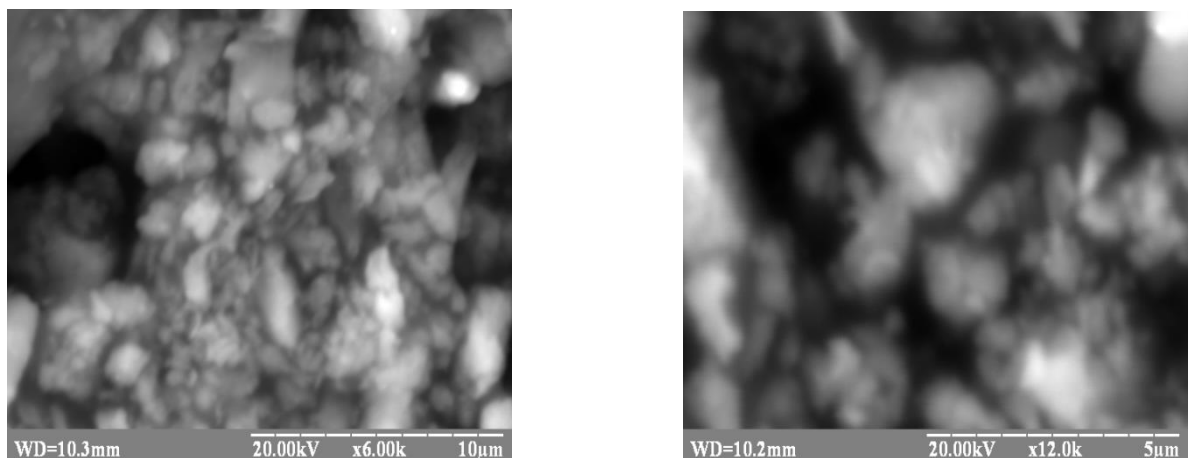


Рисунок 3.2. – Електронно-мікроскопічний знімок зразка *Al-MI* при об'ємній частці металевої фази 0.3 при різному збільшенні.

В результаті проведення електронно-мікроскопічних досліджень, було виявлено, що при об'ємній частці металевого наповнювача $q < 0.3$ структура досліджуваних зразків являє собою гранули металу, ізольовані один від одного

матеріалом матриці. В зразках з $q > 0.3$ металеві наногранули починають утворювати лабіринтну сітку, заповнену сполучним полімером.

3.2. Методика експериментальних досліджень

В даній роботі вимірювання електрофізичних параметрів зразків здійснювалося методами енергетичних коефіцієнтів та діелектричного резонатора (ДР) з Е - типом коливачів.

Метод енергетичних коефіцієнтів. Даний метод полягає в визначенні комплексної діелектричної проникності матеріалу за виміряними значеннями енергетичних коефіцієнтів відбиття R та проходження T через зразок.

Відомо, що в разі нормального падіння випромінювання коефіцієнт відбиття на межі розділу матеріалу і навколишнього середовища визначається як властивостями самого матеріалу, так і властивостями навколишнього середовища і може бути обчислений за наступною формулою [47]:

$$R_e = \left(\left| \frac{N - N_e}{N + N_e} \right| \right)^2 \quad (2.1)$$

де N — показник заломлення матеріалу;

N_e — показник заломлення прилеглої до нього області (області з якої падає випромінювання).

Коефіцієнт пропускання, за умови, що матеріал знаходиться в однорідному середовищі, можна визначити виходячи із закону проходження випромінювання через межу розділу двох матеріалів:

$$T_e = 4 \cdot \frac{N \cdot N_e}{(N + N_e)^2} \quad (2.2)$$

При проходженні ЕМХ через шар речовини її амплітуда буде зменшуватись відповідно до закону Бугера — Ламберта — Бера як:

$$A = A_0 e^{-\alpha x} \quad (2.3)$$

де A_0 — амплітуда ЕМХ на межі розділу двох середовищ;

x — відстань від межі розділу двох середовищ;

α — коефіцієнт поглинання матеріалу.

Також відомо, що показник заломлення матеріалу може бути знайдений з відомого співвідношення:

$$N = \text{Re} \sqrt{\varepsilon^* \mu^*} \quad (2.4)$$

Так як в даному випадку композиційні структури складаються з немагнітних матеріалів то можна вважати, що $\mu^* = 1$.

У випадку нормального падіння випромінювання на вимірюваний зразок в ньому відбуваються процеси відбиття та проходження ЕМХ на його гранях перпендикулярних напрямку поширення хвилі та її поглинання в об'ємі матеріалу зразка відповідно до (2.3) Таким чином з урахуванням (2.1-2.3) коефіцієнти відбиття та проходження через зразок можна визначити як:

$$\begin{cases}
 T = \left(4 \cdot \frac{N \cdot N_e}{(N + N_e)^2} \right)^2 \cdot e^{-\alpha d} + \left(4 \cdot \frac{N \cdot N_e}{(N + N_e)^2} \right)^2 \cdot e^{-\alpha d} \cdot \left(\left(\left| \frac{N - N_e}{N + N_e} \right| \right)^2 \cdot e^{-\alpha d} \right)^2 + \dots \\
 \dots + \left(4 \cdot \frac{N \cdot N_e}{(N + N_e)^2} \right)^2 \cdot e^{-\alpha d} \cdot \left(\left(\left| \frac{N - N_e}{N + N_e} \right| \right)^2 \cdot e^{-\alpha d} \right)^{2n}; \\
 R = \left(\left| \frac{N - N_e}{N + N_e} \right| \right)^2 + \left(4 \cdot \frac{N \cdot N_e}{(N + N_e)^2} \right)^2 \cdot \left(\left| \frac{N - N_e}{N + N_e} \right| \right)^2 \cdot e^{-2\alpha d} + \dots \\
 \dots + \left(4 \cdot \frac{N \cdot N_e}{(N + N_e)^2} \right)^2 \cdot \left(\left| \frac{N - N_e}{N + N_e} \right| \right)^2 \cdot e^{-2\alpha d} \cdot \left(\left(\left| \frac{N - N_e}{N + N_e} \right| \right)^2 \cdot e^{-\alpha d} \right)^2 + \dots \\
 \dots + \left(4 \cdot \frac{N \cdot N_e}{(N + N_e)^2} \right)^2 \cdot \left(\left| \frac{N - N_e}{N + N_e} \right| \right)^2 \cdot e^{-2\alpha d} \cdot \left(\left(\left| \frac{N - N_e}{N + N_e} \right| \right)^2 \cdot e^{-\alpha d} \right)^{2n}.
 \end{cases}$$

(2.5)

або:

$$\begin{cases}
 T = \sum_{i=0}^n \left(4 \cdot \frac{N \cdot N_e}{(N + N_e)^2} \right)^2 \cdot \left(\left(\left| \frac{N - N_e}{N + N_e} \right| \right)^2 \cdot e^{-2\alpha d} \right)^{2i}; \\
 R = \left(\left| \frac{N - N_e}{N + N_e} \right| \right)^2 + \sum_{i=0}^n \left(4 \cdot \frac{N \cdot N_e}{(N + N_e)^2} \right)^2 \cdot \left(\left(\left| \frac{N - N_e}{N + N_e} \right| \right)^2 \cdot e^{-\alpha d} \right)^{2i+2}.
 \end{cases}$$

(2.6)

де n — кількість проходжень ЕМХ від однієї стінки зразка до іншої.

Враховуючи (2.4) та, що в даному випадку $N_e = 1$ маємо:

$$\begin{cases} T = \sum_{i=0}^n \left(4 \cdot \frac{Re\sqrt{\varepsilon^*}}{(Re\sqrt{\varepsilon^*} + 1)^2} \right)^2 \cdot \left(\left(\left| \frac{Re\sqrt{\varepsilon^*} - 1}{Re\sqrt{\varepsilon^*} + 1} \right| \right)^2 \cdot e^{-2\alpha d} \right)^{2i}; \\ R = \left(\left| \frac{Re\sqrt{\varepsilon^*} - 1}{Re\sqrt{\varepsilon^*} + 1} \right| \right)^2 + \sum_{i=0}^n \left(4 \cdot \frac{Re\sqrt{\varepsilon^*}}{(Re\sqrt{\varepsilon^*} + 1)^2} \right)^2 \cdot \left(\left(\left| \frac{Re\sqrt{\varepsilon^*} - 1}{Re\sqrt{\varepsilon^*} + 1} \right| \right)^2 \cdot e^{-\alpha d} \right)^{2i+2}. \end{cases}$$

(2.7)

Отримані вирази для коефіцієнтів відбиття та проходження ЕМХ через зразок представляють собою нелінійну систему рівнянь з двома невідомими: дійною та уявною частиною комплексної діелектричної проникності. Розрахунок діелектричної проникності зразків проходив шляхом розв'язання даної системи рівнянь чисельними методами.

При розрахунку кількість проходжень ЕМХ від однієї стінки зразка до іншої n визначалася заданою точністю розрахунку, яка в даному випадку становила 0,1 %.

Для вимірювання енергетичних коефіцієнтів досліджуваних зразків використовувався панорамний вимірювач Р2-61.

Автоматичний панорамний вимірювач Р2-61 призначений для вимірювання та відтворення на екрані електронно-променевої трубки частотних характеристик коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ) і послаблення потужності хвилі при проходженні в пристроях хвилеводних трактів перетином $23 \times 10 \text{ мм}^2$ в діапазоні від 8,15 до 12,05 ГГц. Межі вимірювання ослаблення — від 0 до 50 дБ. Вимірювання КСХ та ослаблення можуть здійснюватися і на фіксованій частоті. Структурна схема панорамного вимірювача Р2-61 для вимірювання ослаблення потужності хвилі представлена на рис.3.3. Панорамний вимірювач складається з генератора НВЧ — 1, типу ГКЧ-61, індикатора ослаблення — 2, типу Я2Р-67, коаксіально - хвилеводного переходу — 3, двох спрямованих відгалужувачів (СВ) — 4 («падаюча хвиля») і 5 («відбита хвиля») з детекторами, вимірювального вузла — 6 і кінцевого поглинаючого навантаження — 7. Направлені відгалужувачі

падаючої хвилі 4 і 5 використовуються для відгалуження частини енергії одної із двох електромагнітних хвиль, що розповсюджуються в хвилеводному тракті, а саме частини енергії падаючої хвилі. Також в них вмонтовані кристалічні детектори в яких наводиться ЕРС, що пропорційна квадрату напруженості електричного поля електромагнітної хвилі, тобто її потужності. Поглинаюче навантаження 7 використовується для поглинання падаючої хвилі на кінці хвилеводного тракту, зменшуючи таким чином амплітуду відбитої хвилі [48].

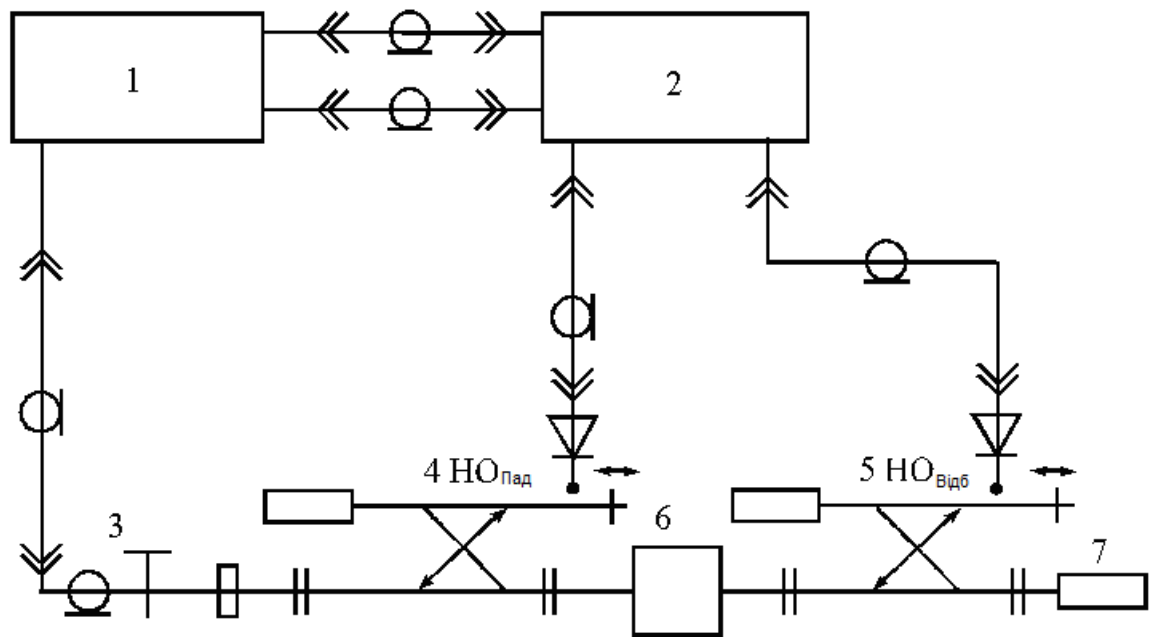


Рисунок 3.3. – Структурна схема панорамного вимірювача Р2-61 для вимірювання ослаблення потужності хвилі.

На рис.3.4 показаний вимірювальний вузол, що представляє собою відрізок роз'ємного хвилеводного, в порожнині якого розміщується досліджуваний зразок.

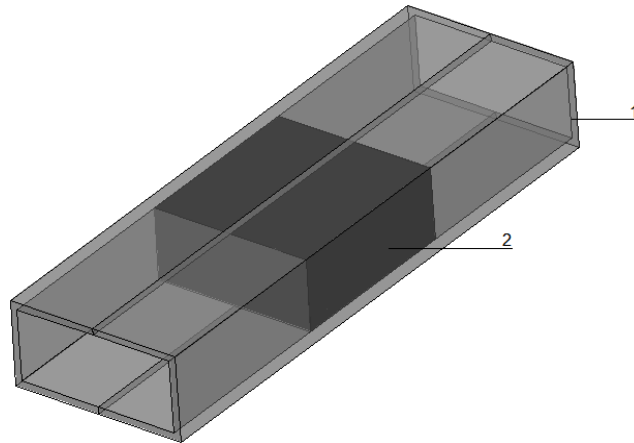


Рисунок 3.4. – Вимірювальний вузол:

1 — відрізок роз'ємного хвелеводного тракту;

2 — досліджуваний зразок.

Для зменшення похибки вимірювань за даним методом використовувалися еталонні зразки з відомими діелектричними параметрами, та статистична обробка результатів вимірювання, що дозволило забезпечити похибку вимірювання діелектричної проникності менше 9 %.

Метод діелектричного резонатора з Е - типом коливань. Даний метод полягає в експериментальному визначенні резонансної частоти f_0 і добротності Q_0 ДР з подальшим розрахунком діелектричної проникності за відомими розмірами резонатора і виміряними значеннями f_0 та Q_0 .

Схема установки для вимірювання методом діелектричного резонатора з Е - типом коливань представлена на рис.3.5. Прямокутний або циліндричний ДР 1, виготовлений із досліджуваного матеріалу з відомими геометричними розмірами розміщується між двома паралельними металевими пластинами 2 покритими сріблом або золотом. Одна з пластин установлюється з можливістю переміщення в напрямку перпендикулярному площинам металічних дзеркал і через шток прикріплена до мікрометричного гвинта 4, що дає змогу вимірювати товщину діелектричного включення. Вимірювальна секція включається в одну з відомих схем вимірювання резонансних частот і власних добротностей резонаторів за допомогою НВЧ кабелів 3 і визначаються f_0 і Q_0 нижчого типу

коливань ДР без повітряного зазору, так як в цьому випадку на результати вимірювання і розрахунку не впливає похибка визначення товщини резонатора [49].

Вимірювання проводиться кілька разів (кількість вимірювань визначається необхідним рівнем надійності отриманих результатів). Після статистичної обробки результатів отримуємо уточнені значення f_0 і Q_0 . Потім за отриманими значеннями проводиться розрахунок діелектричної проникності. Статистична обробка необхідна для зменшення впливу випадкової похибки вимірювання.

При викладеній вище методиці вимірювання електрофізичних параметрів матеріалів похибка вимірювання діелектричної проникності визначається неточністю вимірювання поперечних геометричних розмірів зразка та неточністю визначення резонансних частот і може бути оцінена як похибка непрямих вимірювань з урахуванням статистичної незалежності похибок окремих вимірювань параметрів і характеристик резонаторів.

Для циліндричного резонатора :

$$\delta\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial R}\delta R\right)^2 + \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial f}\delta f\right)^2} \quad (2.8)$$

де R - радіус резонатора;

f - частота ЕМХ.

Для зменшення похибки вимірювань використовувалися еталонні зразки з відомими діелектричними параметрами, що дозволило забезпечити похибку вимірювання для дійсної частини діелектричної проникності менше 1,5 %, а для уявної частини — менше 7,5 %.

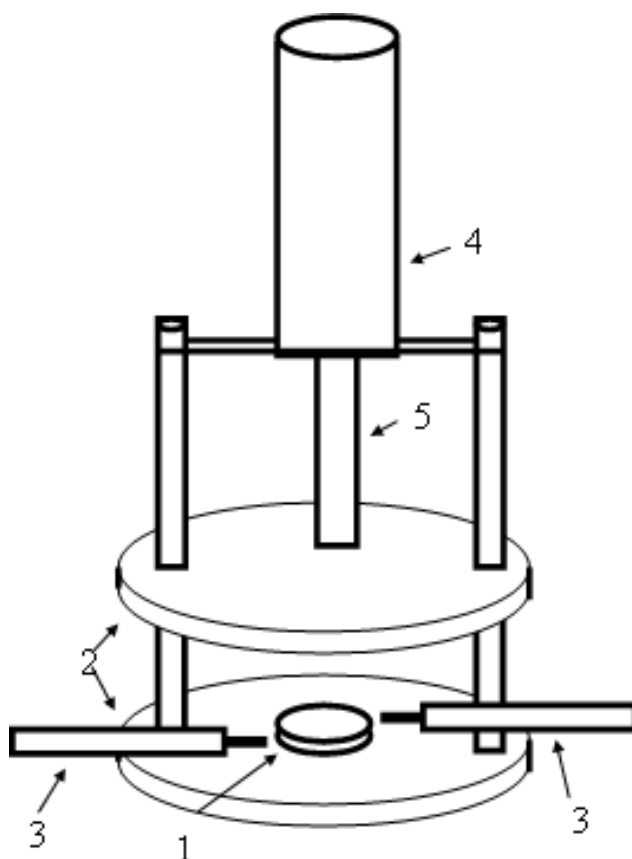


Рисунок 3.5. – Секція для вимірювання електрофізичних параметрів діелектричних матеріалів методом діелектричного резонатора з Е - типом коливань.

3.3. Результати експериментальних досліджень залежностей енергетичних коефіцієнтів відбиття та проходження від об'ємної частки металевого наповнювача

Значення виміряних енергетичних коефіцієнтів відбиття та проходження зразків від об'ємної частки металевого наповнювача пронормованих на 1 см товщини наведено в табл. 3.1 та 3.2 відповідно.

Таблиця 3.1 – Залежність проноrmованих на 1 см товщини енергетичних коефіцієнтів проходження зразків від об'ємної частки металевого наповнювача.

Об'ємна частка, q	Коефіцієнт проходження			
	Al-M1	Al-M2	Al-M3	Cu-M3
0	0,7	0,8	0,78	0,78
0,1	0,014	0,17	0,41	0,36
0,2	8,6E-10	2,0E-18	0,03	0,079
0,3	1,0E-13	3,1E-42	1,4E-09	5,3E-09
0,4	9,6E-23	2,1E-165		6,9E-20
0,5	1,6E-41			
0,6	7,7E-100			
0,7	5,0E-106			

Таблиця 3.2 – Залежність проноrmованих на 1 см товщини енергетичних коефіцієнтів відбиття зразків від об'ємної частки металевого наповнювача

Об'ємна частка, q	Коефіцієнт відбиття			
	Al-M1	Al-M2	Al-M3	Cu-M3
0	0,06	0,032	0,069	0,069
0,1	0,12	0,053	0,085	0,1
0,2	0,16	0,06	0,13	0,12
0,3	0,22	0,094	0,15	0,19
0,4	0,3	0,14		0,23
0,5	0,32			
0,6	0,38			
0,7	0,45			

Графіки експериментальних залежностей енергетичних коефіцієнтів проходження та відбиття досліджуваних зразків від об'ємної частки дисперсної фази пронормованих на 1 см товщини наведено на рис. 3.6 – 3.9.

Як слідує з отриманих експериментальних залежностей зі збільшенням об'ємної частки дисперсної фази коефіцієнт проходження T через матеріал зразка різко спадає, а коефіцієнт відбиття зростає. При об'ємній частці металевго наповнювача 0,3 коефіцієнт проходження зменшується більше ніж на вісім порядків, порівняно з матеріалом матриці. При цьому коефіцієнт відбиття зростає не більше ніж в 4 рази. Це робить перспективним використання даних матеріалів при розробці нових ефективних радіопоглинаючих захисних покриттів.

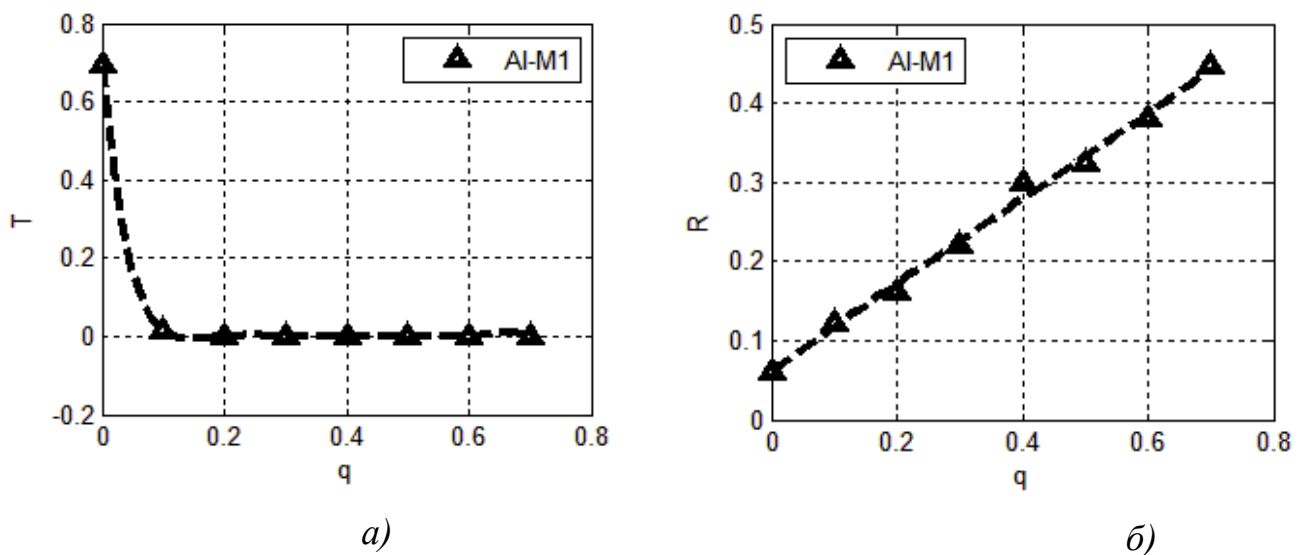
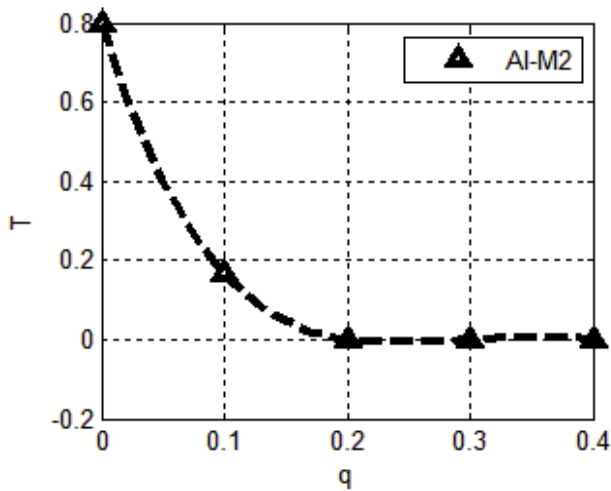
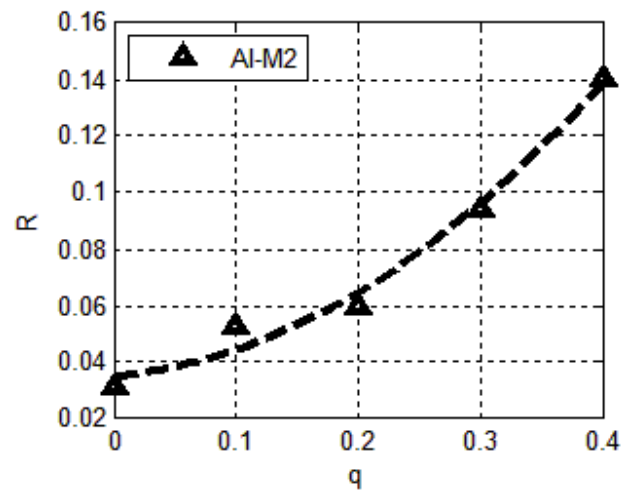


Рисунок 3.6. – Графіки експериментальних залежностей енергетичних коефіцієнтів проходження та відбиття від об'ємної частки металевго наповнювача пронормованих на 1 см товщини для зразків *Al-M1*:

а — коефіцієнт проходження; б — коефіцієнт відбиття



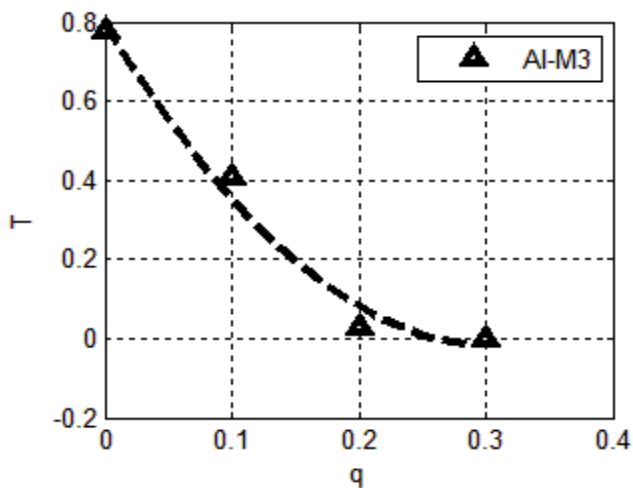
а)



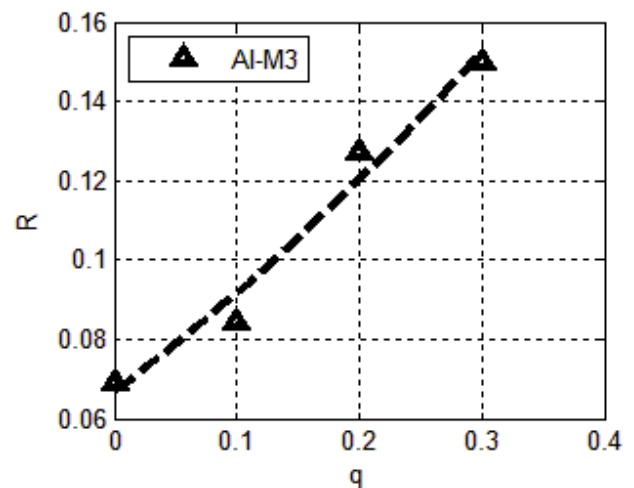
б)

Рисунок 3.7. – Графіки експериментальних залежностей енергетичних коефіцієнтів проходження та відбиття від об'ємної частки металевого наповнювача пронормованих на 1 см товщини для зразків *Al-M2*:

а — коефіцієнт проходження; б — коефіцієнт відбиття



а)



б)

Рисунок 3.8. – Графіки експериментальних залежностей енергетичних коефіцієнтів проходження та відбиття від об'ємної частки металевого наповнювача пронормованих на 1 см товщини для зразків *Al-M3*:

а — коефіцієнт проходження; б — коефіцієнт відбиття

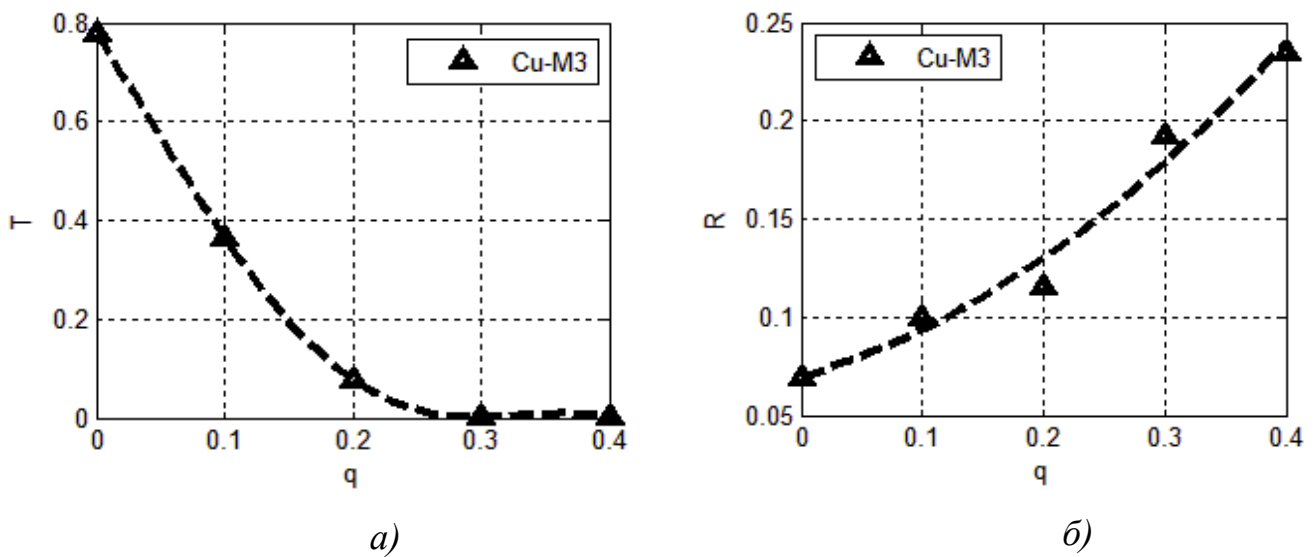


Рисунок 3.9. – Графіки експериментальних залежностей енергетичних коефіцієнтів проходження та відбиття від об'ємної частки металевого наповнювача пронормованих на 1 см товщини для зразків *Cu-M3*:

а — коефіцієнт проходження; б — коефіцієнт відбиття

3.4. Результати експериментальних досліджень залежностей діелектричної проникності зразків від об'ємної частки металевого наповнювача

Результати дослідження залежностей дійсної та уявної частини діелектричної проникності зразків від об'ємної частки металевого наповнювача наведено в табл. 3.3 та 3.4 відповідно.

На рис. 3.10 – 3.13 наведено графіки експериментальних залежностей дійсної ε' та уявної ε'' частини ефективної діелектричної проникності досліджуваних зразків від об'ємної частки металевого наповнювача.

Таблиця 3.3 – Залежність дійсної частини діелектричної проникності зразків від об'ємної частки металевого наповнювача.

Об'ємна частка, q	Ефективна діелектрична проникність, дійсна частина			
	Al-M1	Al-M2	Al-M3	Cu-M3
0	2,71	2,05	2,94	2,94
0,1	4,32	2,55	3,31	3,7
0,2	5,5	2,71	4,45	4,11
0,3	7,66	3,55	5,12	6,58
0,4	11,72	4,82		8,3
0,5	13,23			
0,6	17,9			
0,7	25,25			

Таблиця 3.4 – Залежність уявної частини діелектричної проникності зразків від об'ємної частки металевого наповнювача.

Об'ємна частка, q	Ефективна діелектрична проникність, уявна частина			
	Al-M1	Al-M2	Al-M3	Cu-M3
0	0,19	0,11	0,09	0,9
0,1	0,21	0,13	0,12	0,13
0,2	0,3	0,25	0,17	0,15
0,3	0,35	0,32	0,26	0,22
0,4	0,46	0,49		0,31
0,5	0,54			
0,6	0,75			
0,7	0,87			

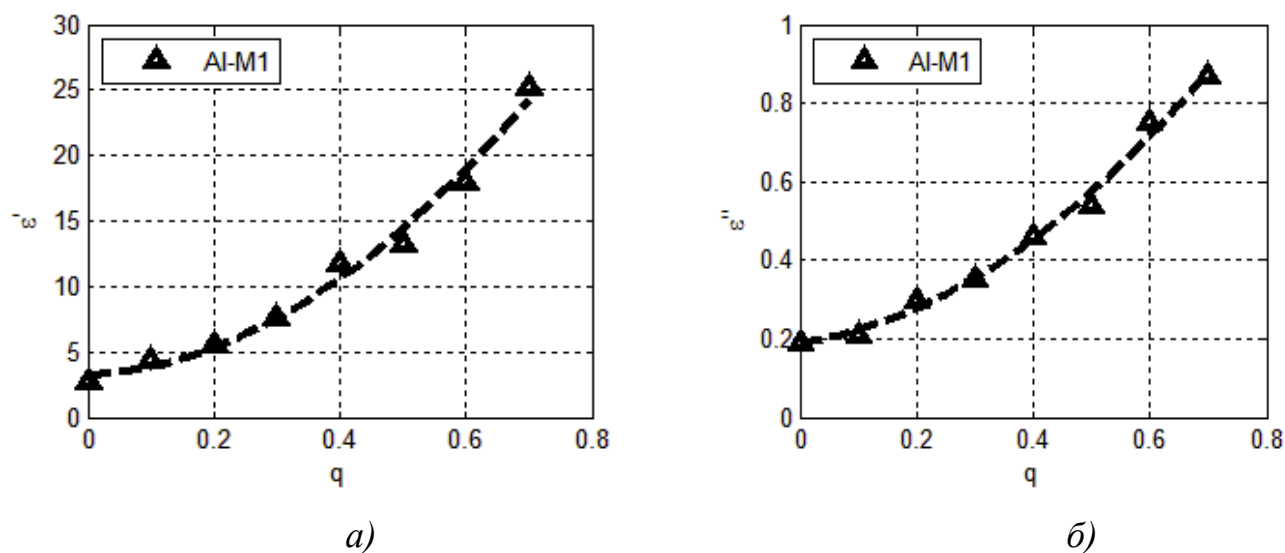


Рисунок 3.10. – Графіки експериментальних залежностей дійсної та уявної частини ефективної діелектричної проникності досліджуваних зразків від об'ємної частки металевого наповнювача для зразків *Al-M1*:

а — дійсна частина; б — уявна частина

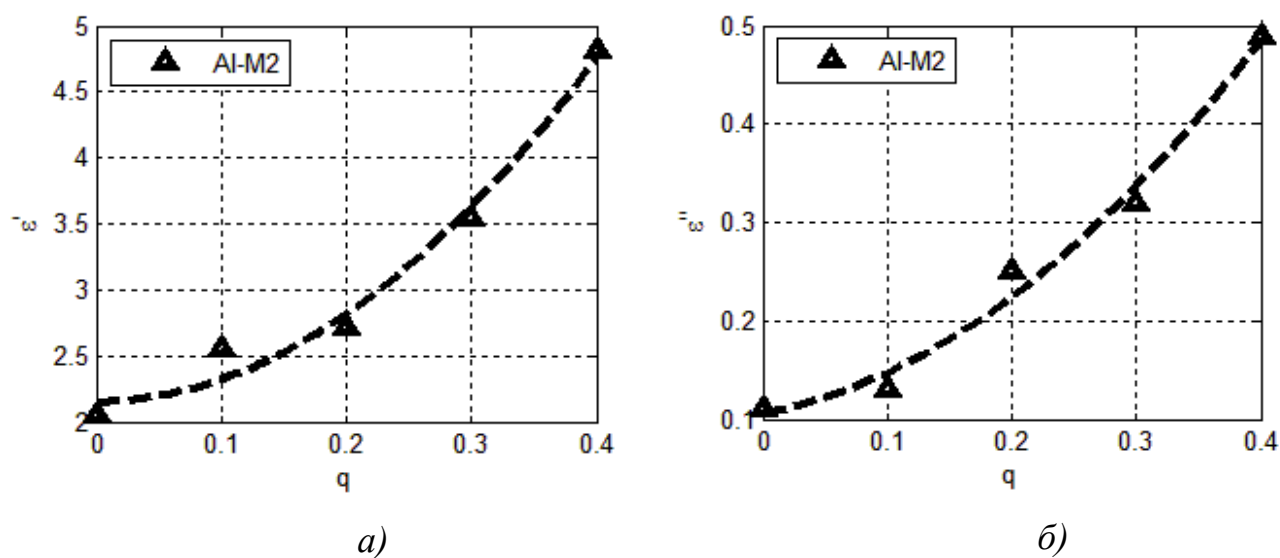
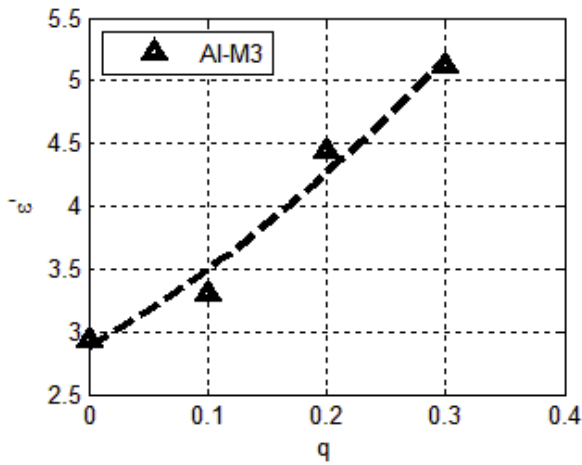
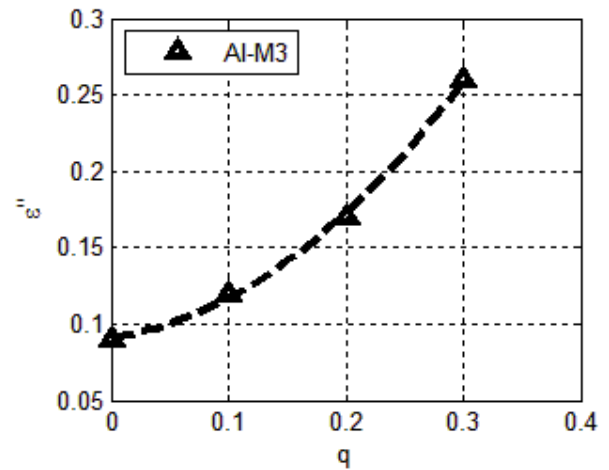


Рисунок 3.11. – Графіки експериментальних залежностей дійсної та уявної частини ефективної діелектричної проникності досліджуваних зразків від об'ємної частки металевого наповнювача для зразків *Al-M2*:

а — дійсна частина; б — уявна частина



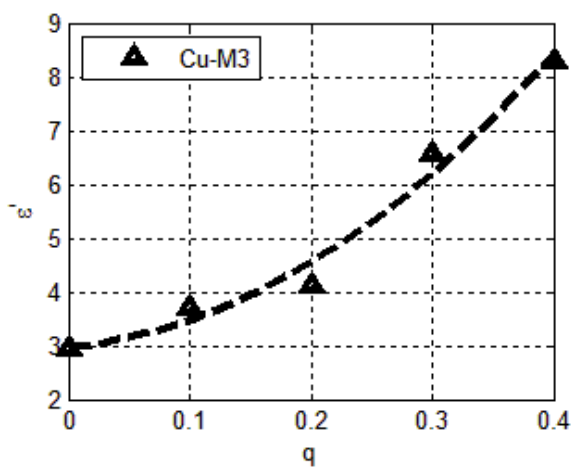
a)



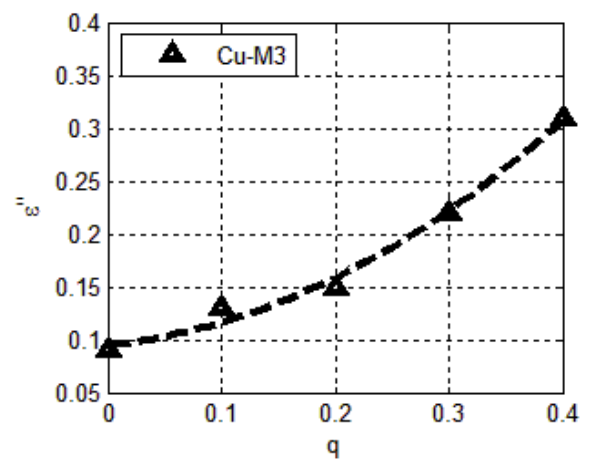
б)

Рисунок 3.12. – Графіки експериментальних залежностей дійсної та уявної частини ефективної діелектричної проникності досліджуваних зразків від об'ємної частки металевого наповнювача для зразків *Al-M3*:

а — дійсна частина; б — уявна частина



a)



б)

Рисунок 3.13. – Графіки експериментальних залежностей дійсної та уявної частини ефективної діелектричної проникності досліджуваних зразків від об'ємної частки металевого наповнювача для зразків *Cu-M3*:

а — дійсна частина; б — уявна частина

Як слідує з отриманих залежностей дійсна та уявна частини комплексної діелектричної проникності різко зростають зі збільшенням об'ємної частки дисперсної фази. При об'ємній частці металевого наповнювача $q = 0.3$ дійсна частина діелектричної проникності в середньому збільшується в 2 рази порівняно з матеріалом матриці. При цьому спостерігається середнє збільшення уявної частини діелектричної проникності в 2,5 рази. Таким чином шляхом зміни об'ємної частки металевого наповнювача, на основі композиційних матеріалів метал-діелектрик, можливо створювати матеріали із заданим значенням ефективної діелектричної проникності.

Висновки до розділу

На основі сумішевої технології розроблено методику виготовлення композиційних метало-діелектричних композиційних матеріалів для НВЧ досліджень.

Адаптовано метод діелектричного резонатора з Е - типом коливань, для дослідження діелектричних властивостей метало-діелектричних композитів, що дозволило забезпечити похибку визначення дійсної частини діелектричної проникності менше 1,5 %, та уявної частини — менше 7,5 %.

РОЗДІЛ 4: РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

4.1. Опис ідеї проекту

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Дослідження поглинальних покриттів на основі метало-діелектричних композитів	1. В лабораторіях для створення безехових камер.	Забезпечення електромагнітної сумісності вузлів і блоків високочастотних пристроїв.
	2. В промисловості для створення металевих поверхонь літаків, танків, ракет і кораблів.	Радіолокаційного маскування об'єктів, захисту робочого персоналу від впливу НВЧ випромінювання.
	3. В пристроях широкого застосування, таких як: мобільні телефони, комп'ютери, фото-і відеокамери.	Мініатюрність, мала вага і висока швидкодія сучасних апаратних засобів.

Таблиця 4.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	ВРМ-2	ВРМ-4	ВРМ-7			
1.	Діапазон робочих частот, ГГц	7 до 13	8 до 13	8 до 12	7,5 12,5			+
2.	Робоча температура, °С	-40 +120	-15 +60	-40 +120	-60 +180			+
3.	Розмір, мм	2,5±0,1	3,8 ±0,2	2,5±0,1	2,5± 0,1		+	
4.	Коефіцієнт поглинання по потужності на частоті 8 ГГц, дБ	10	10,5	11	11,5	+		
5.	Коефіцієнт поглинання по потужності на частоті 12 ГГц, дБ	20	12	18	19,5			+

4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Виготовлення поглинальних покриттів на основі метало-діелектричного композита	Введення різної об'ємної частки нанодисперсного металу в матеріал матриці	Наявна	Доступна
		Панорамний вимірювач Р2-61	Наявна	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Всі компоненти наявні в широкому доступі і лише використання панорамного вимірювача Р2-61 вимагає доступу до лабораторії				

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, <i>од</i>	6
2.	Загальний обсяг продаж, <i>грн/ум.од</i>	~ 100000 \$
3.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4.	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6.	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	10 %

Оскільки середня рентабельність становить близько 10 %, ринок можна вважати прибутковим.

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Безпека, Необхідність визначення складу якісного/кількісного середовища	Дослідницькі лабораторії, військова промисловість	Поведінку клієнта формують надійність, висока повторюваність	Достовірність даних по властивостях матеріалу, чіткий бізнес-план.

Таблиця 4.6 – Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Наявність кваліфікованих кадрів	Продукт є наукоємним тому потрібні люди з певними навичками	Пошук персоналу у науково-дослідних інститутах та організаціях
2.	Глобальна економічна криза	Проблеми з капіталізацією, зниження продажів	Підвищення цін. Розробка кращого і більш дешевого методу. Пошук нових ринків.
3.	Проблеми постачання	Проблеми зі збіркою нових пристроїв	Пошук нових постачальників

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Спонукає розробляти і виробляти нові продукти, знижувати витрати їх виробництва і вартість	Ускладнення структури та функціональної наповненості товару
2.	Попит	Зацікавленість військової сфери	Налагодження мостів із державою.
3.	Зростання ринку композиційних матеріалів	Зростання об'ємів продажу	Накопичення капіталу для подальшого розширення компанії

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції: - олігополія	На ринку присутня дуже невелика кількість фірм, які займаються поглинальними композитними матеріалами	Підвищувати якість товару за рахунок використання передових технологій та залучення кваліфікованих кадрів
2. За рівнем конкурентної боротьби: - національний	На Україні дуже мала кількість компаній, загалом всі фірми знаходять за кордоном	Створювати локалізований веб-сайт компанії і налагоджувати експорт продукції

<p>3. За галузевою ознакою:</p> <p>- внутрішньогалузева</p>	<p>Економічна боротьба між різними товаровиробниками, які діють в одній галузі економіки, виробляють і реалізують однакові товари, що задовольняють одну й ту саму потребу, але мають відмінності у виробничих затратах, якості, ціні, тощо.</p>	<p>Відслідковувати продукти конкурентів</p>
<p>4. Конкуренція за видами товарів:</p> <p>- товарно-видова</p>	<p>Конкуренція між товарами одного виду</p>	<p>Покращувати якість товару</p>
<p>5. За характером конкурентних переваг:</p> <p>- не цінова</p>	<p>Ціна продукції досить висока, тому головне досягти хорошої якості</p>	<p>Продавати товар за конкретною ціною.</p>
<p>6. За інтенсивністю:</p> <p>- не марочна</p>	<p>Боротьба носить явно не марочний характер</p>	<p>Відсутність у галузі такого поняття, як «Бренд».</p>

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Компанія НТЦ «Фарадей»	-	Кількість постачальників	Вимоги до якості (відтворюваність заявлених властивостей)	Замінники існують, проте технологічно не вигідні
Висновки:	Інтенсивність висока, бо продукт є наукоємним і тому не кожна фірма здатна розробити такий продукт	-	Постачальники не диктують умови роботи на ринку	Товар має бути якісним та мати сталі властивості	Обмежень немає

Незважаючи на високу конкуренцію в даній галузі, входження можливе завдяки низькій ціні і новим можливостям прототипу.

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Ціна	Оскільки ціна нижча ніж у конкурентів
2.	Терміни та масовість виробництва	Необхідно вчасно постачати продукт і знижувати ціну виробництва.
3.	Гарні робочі характеристики	Сенсорні можливості пристрою знаходяться на рівні з конкурентами.
4.	Метод детектування	Оптичний метод детектування розширює спектр застосувань

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з нашим проектом						
			-3	-2	-1		1	2	3
1.	Ціна	14			+				
2.	Терміни та масовість виробництва	15					+		
3.	Гарні робочі характеристики	20							+
4.	Метод детектування	20				+			

Таблиця 4.12 – SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: гарні робочі характеристики, надійність	Слабкі сторони: ціна.
Можливості: знижувати витрати на виробництво продукції, покращувати електродинамічні властивості.	Загрози: відсутність кваліфікованих кадрів на ринку праці; зниження попиту; поява нових конкурентів.

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Розробка більш дешевого композита з такими ж властивостями.	50 %	2 роки
2.	Розробка більш дешевого композита з дещо гіршими властивостями.	75 %	1 рік

Обрано альтернативу № 2.

4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Дослідницькі лабораторії	Готові	Високий	Низька	Низька
2.	Військові структури	Готові	Високий	Висока	Висока
Які цільові групи обрано: обрано цільову групу №1 та №2.					

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1.	Розробка більш дешевого композита з такими ж властивостями	За рахунок пріоритету вибору більш дешевого аналога з подібними характеристиками	Можливість досягнення тих же результатів з використанням більш дешевих підходів	Стратегія лідерства на витратах

2.	Розробка більш дешевого композита з дещо гіршими властивостями	За рахунок пріоритету вибору більш дешевого аналога	Дещо понизити рівень пропонованих властивостей продукту, щоб знизити ціну	Стратегія диференціації
----	--	---	---	-------------------------

Обрано стратегію диференціації.

Таблиця 4.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Ні	Обидва варіанти	Ні	Заняття конкурентної ніші

Таблиця 4.17 – Визначення стратегії позиціонування

№	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкуренто спроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Якість	Лідерства на витратах	Висока якість	Оптимальне співвідношення ціна/якість, покращення існуючих характеристик.
2.	Точність	Лідерства на витратах	Висока точність	
3.	Ціна	Лідерства на витратах	Низька ціна	

4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 4.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Низька ціна	Найнижча ціна на ринку	Найнижча ціна на ринку
2.	Висока якість	Висока якість	Висока якість
3.	Високі електродинамічні властивості	Одні із найкращих властивості	Хороший коефіцієнт поглинання

Таблиця 4.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Поглинальне покриття на основі метало-діелектричних композитів		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Діапазон робочих частот	М	Вр
	2. Коефіцієнт поглинання	М	Тх
		М	Тл
	3. Робоча температура		
	Якість: відповідає вимогам стандартів		
	Пакування: пристрій		
Марка: «КОМПОЗИТ»			
III. Товар із підкріпленням	До продажу: договір, гарантія.		
	Після продажу: доставка, підтримка.		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патентні права.			

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення ціни

№	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	-	200 – 800\$	більше 9000\$	100 – 600\$

Таблиця 4.21 – Формування системи збуту

№	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Найкращі характеристики за найнижчу ціну	Встановлення контакту з клієнтами, інформування про характеристики сенсора, зберігання.	Канал першого рівня	Виробник безпосередньо збуває продукцію покупцям

Таблиця 4.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонува вання	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Вибір найбільш привабливого і надійного продукту	Прямі - канал комунікації, коли інформація передається безпосередньо від інформатора до інформованої особи	Якість, високі електродин амічні властивості	Показати всі переваги вдосконалено го продукту.	Хороші характеристик и та висока якість

Висновки до розділу

Як, показав проведений вище аналіз, виведення даного продукту на ринок є конкурентоспроможним та рентабельним. Рентабельність виражається у низькому рівні конкуренції, зростанні попиту на продукцію та динаміці ринку, де все більше та більше з'являється запитів на вдосконалення методів вимірювання параметрів композиційних матеріалів у НВЧ діапазоні.

Основними клієнтами, зацікавленими у використанні даних пристроїв є лабораторії для створення безехових камер, в промисловості для створення металевих поверхонь літаків, танків, ракет і кораблів. Особливих проблем входження у ринок не передбачено.

Головними показниками конкурентоспроможності проекту є його малогабаритність порівняно з аналогами, якість електродинамічних властивостей, великий діапазон робочих частот.

ВИСНОВКИ

1. Теоретично досліджено властивості метало-діелектричних композиційних матеріалів у НВЧ діапазоні частот.
2. Експериментально перевірено отриману модель поглинального покриття на основі композитних матеріалів. Різниця між розрахованими та отриманими експериментальними значеннями не перевищували 9 %, що дозволяє зробити висновок про можливість використання запропонованої моделі.
3. Запропоновано варіанти використання методу енергетичних коефіцієнтів для дослідження діелектричних властивостей метало-діелектричних композитів, що дозволяють спростити процес розроблення поглинаючих та відбиваючих покриттів на основі композитів діелектрик метал.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Свирская, С.Н. Строение и классификация полимеров: метод. Пособие // С.Н. Свирская, И.Л. Трубников. – Ростов: Издво. Южного федерального университета, 2007. – 22 с.
2. Энциклопедия полимеров. В 3 т. – М. : БСЭ, 1977. – Т. 1 – 3.
3. Бондалетова Л. И., Бондалетов В. Г. Полимерные композиционные материалы (часть 1) // Томский политехнический университет. – 2013. – с. 14 -19.
4. Шевченко, В.Г. Основы физики полимерных композиционных материалов: учеб. пособие // В.Г. Шевченко. – М. : Издво. Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, 2010. – 98 с.
5. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология : учебное пособие вузов // М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г.С. Головкин; под ред. А.А. Берлина. – Спб. : Профессия, 2008. – 560 с.
6. Л.Н. Тялина, А.М. Минаев, В.А. Пручкин Новые композиционные материалы // ГОУ ВПО ТГТУ, – 2011. – с. 6
7. В.А. Рогов, М.И. Шкарупа, А.К. Велис Классификация композиционных материалов и их роль в современном машиностроении // Вестник РУДН, серия Инженерные исследования, – 2011 .–№2.– с. 44 – 46.
8. Алексеев А.Г., Корнев А.Е. Магнитные эластомеры. М.: Химия.– 1987.– 240 с.
9. Антонов А.З., Панина Л.В., Сарычев А.К. Высокочастотная магнитная проницаемость композитных материалов, содержащих карбонильное железо. // ЖТФ.– 1989.–т.59.–№6.– с. 88–94.
10. Meng W., Yuping D., Shunhua L., Xiaogang L., Zhijiang J. Absorption properties of carbonyl-iron/carbon black double-layer microwave absorbers. //J. Magn. Magn. Mater.– 2009.– v. 321.– P. 3442–3446.

11. Cheng Y.L., Dai J.M., Wu D.J., Sun Y.P. Electromagnetic and microwave absorption properties of carbonyl iron/La_{0.6}Sr_{0.4}MnO₃ composites. //J. Magn. Magn. Mater.– 2010.– v. 322.– P. 97–101.
12. Айзикович Б.Б., Алексеев А.Г., Ирумов В.З. // Зарубежная радиоэлектроника. 1994. № 6. с. 26.
13. Филиппов П.Г., Шевченко В.Г., Пономаренко А.Т. и др. Электрические свойства полимерных композитов с электропроводящими дисперсными и волокнистыми наполнителями. Сер. Общеотраслевые вопросы. № 1. М.:Обзорная информация, 1984. 55 с.
14. Je_erson F., Lindsey I. // Intern. Symp. Digest Antennas and Propagation. Philadelphia, 1986. Vol. 1. P. 113.120.
15. Myazakiy, Tominaga S. // IEEE Intern. Symp. Electromagn. Compat. Arlington, 1983. P. 101.116.
16. Машкович М.Д. Электрические свойства неорганических диэлектриков в диапазоне СВЧ. М.: Сов. радио, 1969. 240 с.
17. Гарин Б.М., Дьяконова О.А., Казанцев Ю.Н. Физические свойства резистивных нитей и структур на их основе в СВЧ диапазоне// ЖТФ.– 1999.– т.69.–№1.– с. 104–108.
18. Электрофизические свойства перколяционных систем /Под ред. А.Н. Лагарькова. М.: ИВТАН, 1990. 120 с.
19. Lederer P.G. An introduction to radar absorbent materials / Lederer P.G. – Malvern: Royal Signals and Radar Establishment, 1986.
20. Костин М.В. Теория искусственных магнетиков на основе кольцевых токов/ Костин М.В., Шевченко В.В. // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37, №11. 1922-2003.
21. Булгаков А.А. Дисперсионные свойства периодической полупроводниковой структуры в магнитном поле, направленном вдоль оси периодичности / Булгаков А.А., Кононенко В.К. // ЖТФ. 2005. Т. 73, №11. 15-21.

22. Особенности распространения электромагнитных волн в слоистых магнитных фотонных кристаллах / Беспятых Ю.И., Дикштейн И.Е., Мальцев В.П. и др. // ФТТ. 2003. Т. 45, №11. 2056-2061.
23. Веселаго В.Г. О формулировке принципа Ферми для света, распространяющегося в веществах с отрицательным преломлением / Веселаго В.Г. // УФН. 2002. Т. 172, №10. С1215.
24. Звездин А.К. Магнитооптика тонких пленок / Звездин А.К., Котов В.А. – М.: Наука, 1988.
25. Казанцева Н.Е. Перспективные материалы для поглотителей электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона / Казанцева Н.Е., Рывкина Н.Г., Чмутин И.А. // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48, №2. с. 196-209.
26. Бучельников В.Д. Связанные магнитоупругие и электромагнитные волны в магнетиках вблизи точек ориентационных фазовых переходов / Бучельников В.Д., Бычков И.В., Шавров В.Г. // ФММ. 1988. Т. 66. 222-226.
27. Островский О.З. Оптимизация широкополосных неотражающих многослойных покрытий / Островский О.З., Сорока А.З., Шматько А.А. // Конференция и выставка "СВЧ-техника и спутниковый прием": Материалы конференции. – Севастополь, 1994. – С125-127.
28. Бучельников В.Д. Влияние магнитоупругой связи на отражение электромагнитной волны от ферродиеlectrica / Бучельников В.Д., Бычков И.В., Шавров В.Г. // ФТТ. 1992. Т. 34, №11. 3408-3411.
29. Бабушкин А.В. Отражение электромагнитных волн от поверхности кубического ферродиеlectrica / Бабушкин А.В., Бучельников В.Д., Бычков И.В. // ФТТ. 2002. Т. 44, №12. 2183.
30. Воротницкий Ю.И. Оптимальное проектирование многослойных поглотителей электромагнитных волн / Воротницкий Ю.И. // Болг. физ., ж. 1987. Т. 14, №4. с. 378-385.
31. Пономаренко А.Т., Рывкина Н.Г., Чмутин И.А. // Междунар. науч.-техн. конф. "Полимерные композиты": сб. трудов. – Гомель, 1998. – 19.

32. Мухин А.А. Магнитная спектроскопия антиферромагнитных диэлектриков. Редкоземельные ортоферриты / Мухин А.А., Прохоров А.З. // Труды ИОФ АН СССР. 1990. Т. 25. 162-222.
33. Шнейдерман Я.А. Новые радиопоглощающие материалы / Шнейдерман Я.А. // Зарубежная радиоэлектроника. 1969. №6. 101-124.
34. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах / Бреховских Л.М. – М.: Наука, 1973.-343 с.
35. Пономаренко В.И., Куприянов И.К., Журавлев СИ. // РЭ. 1992. Т. 37, №2. 346.
36. Vegni L. Electromagnetic field radiated by an electric point-source in the omega medium with circular cylindrical symmetry / Vegni L., Toscano A. // Proc. of Bianisotropics, 97, Glasgow, Scotland. – Glasgow, 1997. – P. 129-131.
37. Алимин Б.Ф. Современные разработки поглотителей электромагнитных волн и радиопоглощающих материалов / Алимин Б.Ф. // Зарубежная радиоэлектроника. 1989. №2. 75-82.
38. Semenenko V.N. Microwave effective permeability of conductive helices // Semenenko V.N., Raybov D.E. // Seminar on Electrodynamics of Chiral and Bi-anisotropic Media: Proc. of Bianisotropics, 93, Gomel, Belarus. – Gomel, 1993. -P.116-120.
39. Шевченко В.В. Дифракция на малой киральной частице // Шевченко В.В. // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40, №7. 1777-1789.
40. Bohren Craig F. Microwave-absorbing chiral composites: chirality essential or accidental / Bohren Craig F., Luebbers Raymond, Langdon H. Scott // Appl. Opt. J. 1992. V. 31, №30. P.6403-6407.
41. Композиционные структуры с высокой СВЧ-магнитной проницаемостью, приближающейся к диэлектрической / Казанцев Ю.Н., Костин М.А., Крафтмахер Г.А., Шевченко В.В. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17, №22. 19-24.
42. Левин Л. Теория волноводов / Левин Л. – М.: Радио и связь, 1981.
43. Райхер Ю.Л., Шлиомис М.И. // ЖЭТФ. 1974. Т. 67, вып. 3(9). 1060.

44. Гехт Р.З., Игнатченко В.А., Райхер Ю.Л., Шлиомис М.И. // ЖЭТФ. 1976. Т. 70, №4. 1300.
45. Бондалетова Л. И., Бондалетов В. Г. Полимерные композиционные материалы (часть 1) // Томский политехнический университет. – 2013. – с. 46 -55.
46. Колобашкин С.В. Моделирование композитов и исследование их электрофизических свойств // Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова. – 2017. – с. 52 - 62.
47. Поплавко Ю. (2013), “Диэлектрическая спектроскопия твердого тела”. Lambert Academic Press, P. 253.
48. Беляева Т.А., Бобров А.П., Бобров П.П., Мандрыгина В.Н. Исследование диэлектрических моделей для определения диэлектрической проницаемости связанной воды в грунтах // Тез. докл. Второй открытой Всероссийской конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" Москва, 2005 г. с.237.
49. Татарчук Д.Д. Комбіновані структури НВЧ з діелектричним резонансом Е-типу. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. На правах рукопису. К., 2000 р., 170 с.